

Characterization of Radiation Field in the Steam Generator Water Chambers and Effective Doses to the Workers

Choon-Sik Lee, Jai-Ki Lee
Hanyang University

증기발생기 수실의 방사선장 특성 및 작업자 유효선량의 평가

이춘식 · 이재기

한양대학교

(1999년 12월 6일 접수, 2000년 2월 9일 채택)

Abstract - Characteristics of radiation field in the steam generator(S/G) water chamber of a PWR were investigated and the anticipated effective dose rates to the worker in the S/G chamber were evaluated by Monte Carlo simulation. The results of crud analysis in the S/G of the Kori nuclear power plant unit 1 were adopted for the source term. The MCNP4A code was used with the MIRD type anthropomorphic sex-specific mathematical phantoms for the calculation of effective doses. The radiation field intensity is dominated by downward rays, from the U-tube region, having approximate cosine distribution with respect to the polar angle. The effective dose rates to adults of nominal body size and of small body size(The phantom for a 15 year-old person was applied for this purpose) appeared to be 36.22 and 37.06 mSv^h⁻¹ respectively, which implies that the body size effect is negligible. Meanwhile, the equivalent dose rates at three representative positions corresponding to head, chest and lower abdomen of the phantom, calculated using the estimated exposure rates, the energy spectrum and the conversion coefficients given in ICRU47, were 118, 71 and 57 mSv^h⁻¹, respectively. This implies that the deep dose equivalent or the effective dose obtained from the personal dosimeter reading would be the over-estimate the effective dose by about two times. This justifies, with possible under- or over- response of the dosimeters to radiation of slant incidence, necessity of very careful planning and interpretation for the dosimetry of workers exposed to a non-regular radiation field of high intensity.

Key words - non-regular field, effective dose, steam generator, MIRD phantom, MCNP, dosimetry

요약 - PWR 원전 증기발생기 수실의 방사선장 특성과 그곳에서 작업하는 종사자의 유효선량을 몬테카를로 시뮬레이션으로 평가하였다. 선원향으로는 고리1호기 증기발생기 방사화물 분석결과가 사용되었으며 유효선량 평가에는 MCNP4A코드와 MIRD형 성별 수학적 인형 모의피폭체가 사용되었다. 수실 내부 방사선장은 U튜브 영역에서 내려오는 방사선이 지배적이었으며 극각에 대해 근사적으로 코사인 분포를 나타내었다. 유효선량률은 표준성인과 체격이 작은 성인(이 목적으로 15세 모의피폭체가 사용되었다.)의 경우 각각 36.22 mSv^h⁻¹와 37.06 mSv^h⁻¹로서 체격의 영향은 경미했다. 한편, 모의피폭체의 머리, 가슴 및 하복부에 해당하는 위치에서 평가된 조사선량률과 에너지스펙트럼에 대해 ICRU47에서 주어진 주위선량당량 환산계수를 이용해 평가한 등가선량률은 각각 119, 71, 및 57 mSv^h⁻¹로 나타났다. 따라서 개인선량계 판독에서 얻는 심부선량 또는 유효선량은 앞서 계산한 유효선량률의 2배 정도가 될 것으로 보인다. 이 사실은 일반적인 개인선량계의 경사업사 방사선에 대한 과대/과소 평가 특성과 함께 비정규, 고선량률 방사선장에 종사하는 작업자의 선량계측 계획 및 결과의 해석에 매우 신중해야 함을 알려준다.

중심어 - 비정규 방사선장, 유효선량, 증기발생기, MIRD형 모의피폭체, MCNP, 선량계측

서론

1977년 권고에서 국제방사선방호위원회(ICRP)는 방사선방호를 위한 궁극적 양으로 피폭자의 각 조직이 받은 선량당량에 그 조직의 상대적 위험도에 근거한 조직가중치를 가중하여 합한 유효선량을 도입하였다[1]. 유효선량의 개념은 1990년의 권고 ICRP 60[2]에서도 유지되고 있다. 다만, 방사선가중치를 도입함에 따른 등가선량의 사용, 특별히 고려하는 조직 수의 차이로 인한 조직가중치의 변경이 있었다. 방사선에 피폭하는 사람의 위험을 간단히 표현할 필요성과 유효선량의 개념은 충분히 인정되지만 실제에서는 각 조직의 등가선량이 직접 측정될 수 있는 양이 아니므로 유효선량의 적용이 부적절한 경우도 있다. 그 중의 하나가 비정규 방사선장에 노출되는 경우이다. 여기서 비정규 방사선장이라 함은 ICRP가 유효선량 환산계수를 산출하는 데에 사용한 평행한 넓은 빔과 특성이 다른 방사선장을 의미한다.

넓고 평행한 단순한 방사선장의 경우, 몸통에 착용하는 하나의 개인선량계로 피폭량을 대표적으로 측정할 수 있고 ICRP 74[3]의 유효선량환산계수를 적용하여 유효선량을 산출할 수 있으나, 비정규 방사선장의 경우에는 그렇지 못하다. 장재권 등[4]은 점선원에 의한 방사선 방사선장에서의 유효선량을 평가한 바 있다. 특히 관심 있는 경우가 선량률이 높은 비정규 방사선장이다.

이러한 특별한 경우의 대표적인 사례가 원전의 증기발생기 수질작업이다. 즉, 운영 중인 원전에서는 증기발생기 세관에 누설이 발생할 수 있고 그럴 경우 정기예방정비 기간 중에는 누설이 있는 증기발생기의 세관에 대해 와류탐상검사를 통한 누설관의 확인과 이에 대한 관막음 등 작업을 위해 작업자가 수실에 들어가야 한다. 그런데 증기발생기 수실은 상부의 수많은 세관의 표면에 방사화생성물 등에 의해 높은 수준의 방사성오염이 존재하므로 수실 내 방사선장의 강도가 매우 높다. 누설이 심해 1998년에 교체한 고리1호기 증기발생기의 경우에는 수실 내 선량률이 10 Rh^{-1} 를 넘었다. 특히 수실의 방사선장은 보통의 경우처럼 서있는 작업자의 몸통에 대해 수평방향에 가깝게 입사하는 것이 아니라 오염이 있는 머리 위 U튜브에서 하방으로 내려찍는 형식이 된다.

직업상피폭에 대한 선량한도를 고려하면 위와 같은 특별한 고선량률 작업에서는 작업을 초단위로 관리하게 된다. 이러한 상황에서는 서베이미터로 측정된 조사선량률에 근거한 작업관리가 작업자의 유효선량을 과소평가 한다면 더욱 문제이지만 유효선량을 지나치게 과대평가 하는 것도 불필요하게 많은 작업자를 투입하게 만들어 이로써 집단선량이 증가하는 결과를 초래하므로 역시 문제이다. 따라

서 이러한 강한 비정규 방사선장에서 유효선량의 경향을 파악하는 것은 매우 의미 있는 일이다.

넓고 평행한 빔이 정규 방향이 아닌 여러 방향에서 입사하는 경우의 유효선량에 대한 평가는 Reece 등[5,6]에 의해 많은 연구가 수행된 바 있다. 그러나 증기발생기 수실의 경우에는 완전히 넓고 평행한 방사선장이 아닐 것이 예상되며 극히 강한 방사선장으로 인해 방사선장의 에너지분포와 방향분포를 용이하게 측정할 수 없다는 문제점이 동반된다. 따라서 이 연구에서는 수실의 방사선장 특성을 증기발생기 세관 및 수실표면 크러드 분석 결과를 선원항으로 하여 몬테칼로 시뮬레이션에 의해 구성하였다. 사용된 크러드 자료[7]는 교체하기 이전의 고리1호기 증기발생기에서 얻은 것이다.

재료 및 방법

증기발생기 모델 및 선원항

계산에 사용된 고리1호기 증기발생기의 단순화된 기하학적 모델은 그림1과 같이 U튜브 상단까지만 이루어졌다(그림1). MCNP4A를 사용하여 상부 U튜브부분과 하부 수실 부분을 모사하였고 U튜브 전체와 수실바닥이 오염되어 있는 것으로 가정하였다. 선원항으로 사용된 크러드의 구성과 단위면적 당 방사능 오염도는 표 1과 같다.

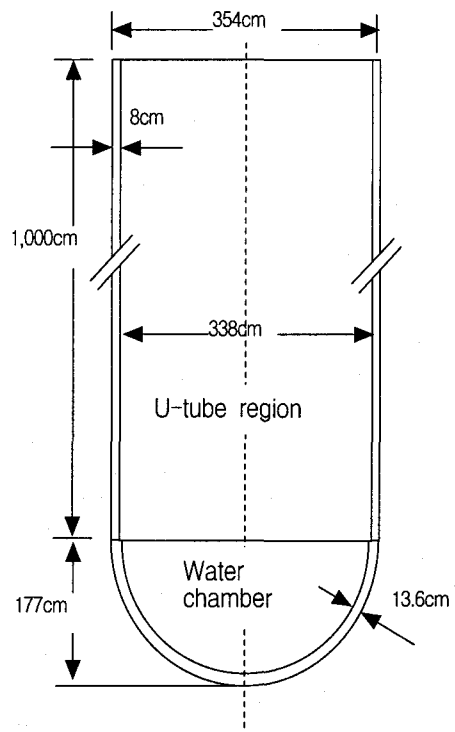


Fig. 1. The geometry of S/G in Kori nuclear power plant unit 1.

Table 1. The contamination and activity for the composition of crud in water chamber and U-tube region [7].

(a) Water chamber

Nuclide	Half life	Contamination ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$)	Ratio (%)	Activity (μCi)
Cr-51	27.70d	1.595E-1	8.53	7.632E+6
Mn-54	312.2d	3.229E-2	1.73	1.545E+6
Fe-59	44.51d	2.391E-2	1.28	1.144E+6
Co-57	271.8d	2.926E-3	0.16	1.400E+5
Co-58	70.88d	1.044E+0	55.81	4.996E+7
Co-60	5.271y	5.899E-1	31.54	2.823E+7
Zn-65	243.8d	1.807E-2	0.97	8.648E+5
Sr-85	64.84d	5.424E-2	4.51	1.823E+4
Zr-95	64.02d	2.311E-2	1.92	7.766E+3
Nb-95	34.97d	4.491E-2	3.74	1.509E+4
Ru-103	39.37d	6.973E-2	5.80	2.343E+4
Ru-106	1.020y	6.683E-2	5.56	2.246E+4
Sn-113	115.1d	2.044E-3	0.17	6.868E+2
Cs-136	13.16d	1.848E-1	15.38	6.210E+4
Ce-141	32.50d	1.407E-2	1.17	4.728E+3
Ce-144	284.6d	1.383E-2	1.15	4.647E+3
Total		1.202E+0	100.0	4.038E+5

(b) U-tube region

Nuclide	Half life	Contamination ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$)	Ratio (%)	Activity (μCi)
Cr-51	27.70d	1.595E-1	8.53	7.632E+6
Mn-54	312.2d	3.229E-2	1.73	1.545E+6
Fe-59	44.51d	2.391E-2	1.28	1.144E+6
Co-57	271.8d	2.926E-3	0.16	1.400E+5
Co-58	70.88d	1.044E+0	55.81	4.996E+7
Co-60	5.271y	5.899E-1	31.54	2.823E+7
Zn-65	243.8d	1.807E-2	0.97	8.648E+5
Total		1.871E+0	100.0	8.952E+7

주된 방사선원은 방사화 부식생성물인 ^{58}Co 와 ^{60}Co 이다. ^{51}Cr 은 0.32 MeV 감마선을 9.8% 방출하는 핵종으로서 방출률이 낮다. 이 오염도가 증기발생기 세관 전체에 대한 전형적인 값으로 보기는 어렵지만 유일한 자료이므로 이 값을 대표값으로 사용하였다. 방사성오염이 U튜브의 1차 측 전체 내표면에 걸쳐 고루 분포하는 것으로 가정하여 산출한 핵종별 총 방사능도 표 1에 제시되어 있다. U튜브 영역은 수 천개의 세관으로 구성되어 있으나 몬테칼로 계산에서는 단순화를 위해 U튜브 부

분을 인코넬 600 튜브와 2차측의 물을 균질화하여 취급하였다. 표 2에 영역별 물질구성을 보였다.

Table 2. The composition and density of water chamber and U-tube region of S/G.

Region	Composition	Density (g/cm^3)	Composition	Density (g/cm^3)
Water chamber (SA533)	C(6)	1.960E-2	Mn(25)	1.021E-1
	Si(14)	2.360E-2	Fe(26)	7.642E+0
	P(15)	2.700E-3	Ni(28)	4.320E-2
	S(16)	3.100E-3	Mo(42)	3.930E-2
U-tube (Inconel-600)	Cr(24)	8.451E-2	Ni(28)	4.067E-1
	Fe(26)	3.698E-2		
Air	N(7)	9.563E-4	O(8)	2.938E-4

인형 팬텀

인형팬텀은 MIRD5 남성팬텀[8]을 사용하였고 체격차이 분석을 위한 작은 성인으로 ORNL의 15세 팬텀[9]을 사용하였다. 성인팬텀의 경우 ICRP 60[2]에서 권고하는 조직가중치가 할당된 장기들 중 식도가 빠져있으므로 Zankl 등[10]이 제시한 식도모델을 사용하였다. 뼈표면 선량의 경우 방사선에 민감한 부위가 뼈표면으로부터 $10\mu\text{m}$ 깊이에 위치하고 있는 얇은 연조직으로 둘러싸여 있기 때문에 모델링이 복잡하므로 Drexler 등[11]의 연구자들의 방법대로 뼈의 평균선량값으로 대체하여 뼈표면선량을 평가했다. 근육의 경우 Zankl[12]과 Yamaguchi 등[13]의 방법대로 몸통에서 모델링된 장기들을 제외한 전영역의 평균선량을 사용하였다. 각 팬텀의 신체크기는 표 3과 같으며 외형 및 $y=0$ 평면에서의 단면이 그림2에 도시되어 있다.

몬테칼로 시뮬레이션

몬테칼로 시뮬레이션에는 MCNP4A[14]를 사용하였으며 감마 단면적 자료는 Hubbell 등[15]의 데이터를 사용하였다. MCNP 모사실험에서 발생하는 고유의 통계적인 오차와 계산시간을 고려하여 유효선량 계산에서는 모사실험 이력(history)을 5×10^6 의 범위로 하였고 이 때 신체 장기 중 상대오차가 가장 큰 갑상선의 경우 상대오차 0.12가 되었다.

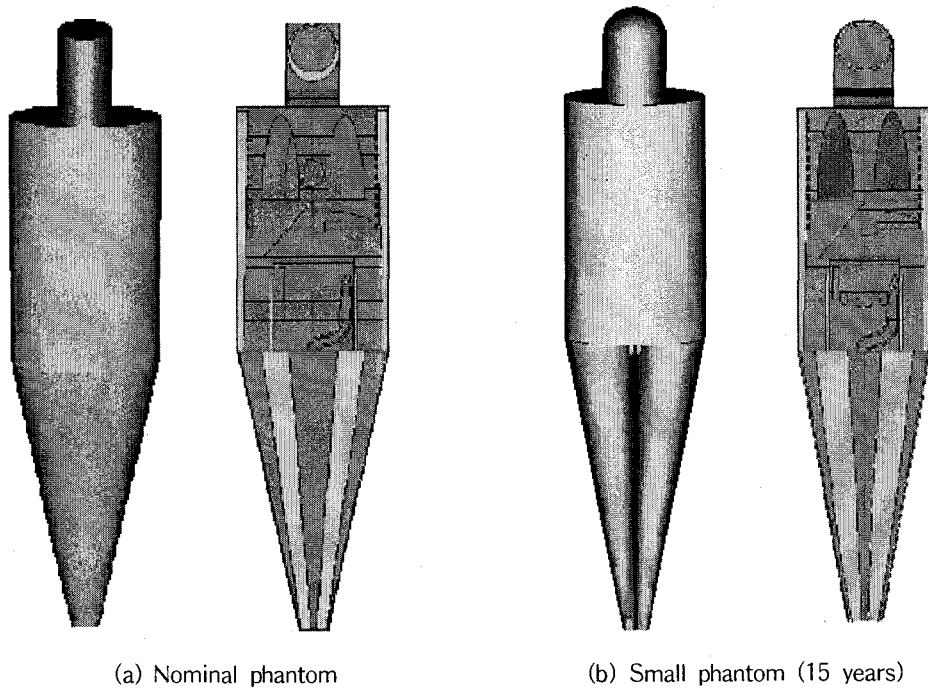


Fig. 2. The external appearance(left) and cross-section at y=0 plane(right) of nominal and small phantoms.

Table 3. The body size of nominal and small phantoms.

	Nominal phantom	Small phantom
Weight [kg]	70	57
Height [cm]	170	160
Thickness [cm]	20	19.6
Width [cm]	40	34.5

결과 및 논의

수실 내 방사선장 특성

그림 3은 수실 내부 방사선장의 형성특성을 살펴보기 위해 MCNP 이력 500개에 대해 수실내로 입사하는 감마선 자취를 SABRINA4.09코드[16]로 그린 것이다. 예상할 수 있는 바와 같이 상부 U튜브 오염으로 인해 방향의 극각(z축과 이루는 각)이 작은 방사선들이 지배적이다. U튜브 노즐 평면에서 이러한 방사선의 방향분포를 극각 구간에 대해

도시한 것이 그림 4이다. 그림에서 보듯이 입자선 속밀도는 극각의 코사인분포에 근사한 모양을 보이며 튜브영역에서 하방으로 내려가는 선속에 비해 수실 바닥 오염으로부터 상부로 올라가는 선속은 충분히 작다. 따라서 이후의 수실 내 사람의 유효선량 계산에서는 수실바닥 오염의 영향은 무시하고 U튜브에 의한 것만을 산출하였다. 그림 4에서 특기할 것은 U튜브에서 내려온 방사선이 수실바닥에 반사되어 위로 향하는 선속을 형성하는 것이 하향 선속 강도의 약 1/10 정도가 된다는 점이다.

그림 4의 선속 분포를 감마선의 에너지 구간으로 분할하여 스펙트럼을 구성한 것이 그림 5이다. 선원향을 구성하는 주된 핵종이 ^{58}Co 와 ^{60}Co 이므로 이들 핵종이 방출하는 감마선의 비총돌 선속이 각각 0.8-0.9 MeV, 1.1~1.2 MeV 및 1.3~1.4 MeV에 나타남은 당연한 것이다. 특기할 것은 U튜브 영역의 큰 체적으로 인해 많은 산란선이 형성되어 0.1~0.3 MeV 영역에 높은 강도를 형성하고 있다.

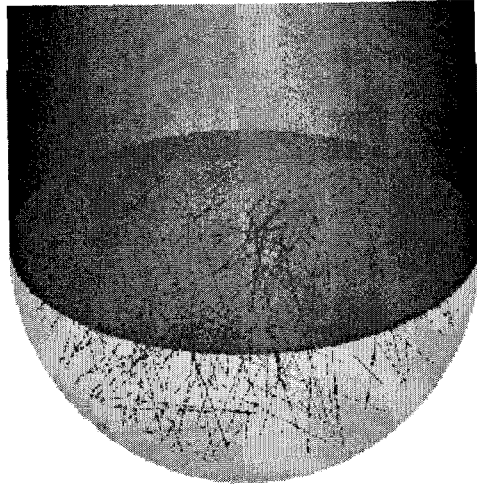


Fig. 3. Random directions of gamma tracks in water chamber of 500 histories rendered by MCNP4A and Sabrina4.09.

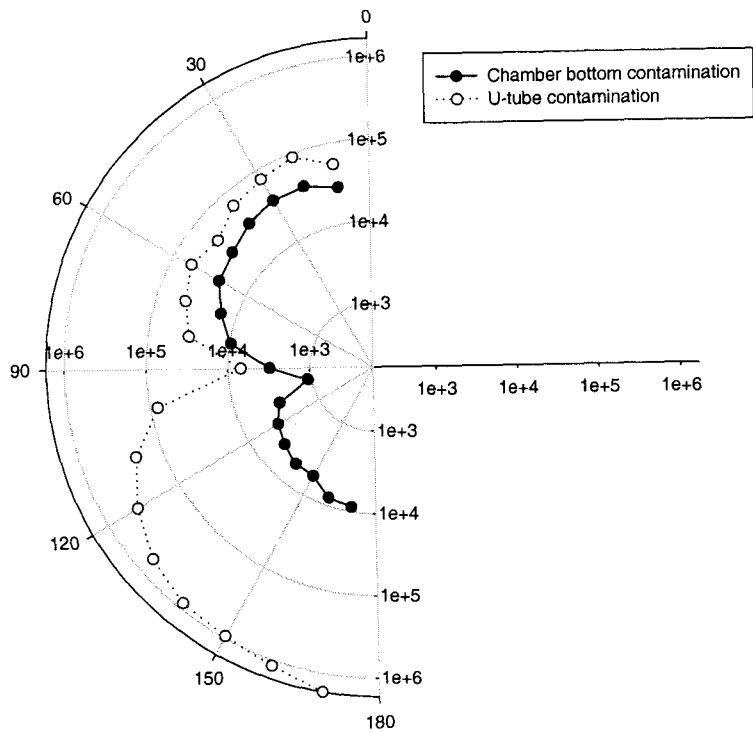


Fig. 4. Directional current rate of gamma penetrating the ceiling of water chamber from the contamination of chamber bottom and U-tube.

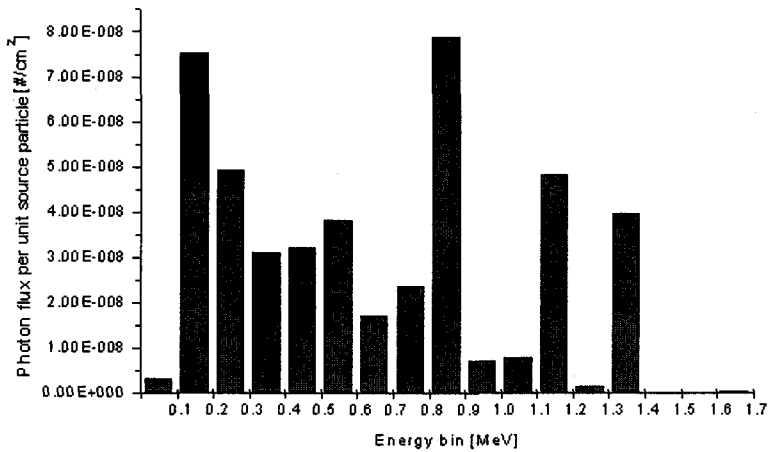


Fig. 5. Gamma energy spectrum on the nozzle plane of the water chamber. High contribution of 0.1-0.3MeV photons scattering are shown in addition to the uncollided photons of 0.8MeV, 1.17MeV and 1.33MeV from ⁵⁸Co and ⁶⁰Co.

유효선량 및 체격차이의 영향 분석

일반적인 작업상황을 모사하기 위해 그림 6에 도시한 것처럼 남성 성인 및 작은 성인 팬텀을 수실 중심에서 X축, Y축으로 50cm씩 이동한 위치에 두고 유효선량을 계산했다. 작업조건이 여성의 작업에는 부적절하므로[10] 남성만을 대상으로 하였다.

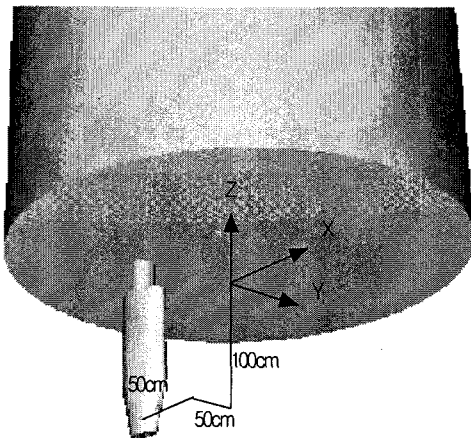


Fig. 6. Nominal phantom in water chamber of steam generator.

증기발생기 수실 내부의 높이보다 팬텀의 키가 크므로 성인의 경우 다리의 무릎 아랫부분을 약 40cm 절단하여 모사하였다. 관절 이하의 골수는 황색골수이므로 이 절단으로 인한 민감한 조직인 골수 선량계산에 영향은 없으며 피부나 뼈표면 등의 조직은 나머지 피부나 뼈표면에 대해 산출되므로 큰 영향을 받지 않는다. 그러나 실제 작업자는 다리를 기마자세로 구부리고 작업함으로써 대퇴부가 방사선 빔에 더 많이 노출될 것이며 작업 목적으로 팔을 들고 있는 경우가 많을 것이므로 골수의 선량이 어느 정도 증가될 수 있다. 그렇지만 골수 선량의 10% 증가는 조직가중치를 적용하면 유효선량의 1.2% 증가에 그치므로 이러한 수정의 영향은 심각하지 않다.

표 4에 표준성인과 체격이 작은 성인(15세 체격)에 대해 산출된 각 장기별 등가선량률과 조직가중치를 적용한 유효선량률을 보였다. 주목할 것은 일반적인 선량계측에서는 주된 조직이 아니라 기타조직의 하나로 분류되는 뇌에 대한 선량의 기여가 이 경우에는 방사선장이 머리 위에서 내려오는 특성으로 인해 등가선량률이 현저히 크고 따라서 유효선량의 기여분도 가장 크다는 점이다. 반대로 일반적인 경우에는 조직가중치가 0.2로서 가장 중시되는 생식선은 낮은 위치로 인해 몸통내의 다른 여러 조직들보다도 유효선량 기여가 작다. 한편 체격변화가 유효선량에 미치는 영향은 표 5와 그림 7에서 확인할 수 있듯이 5% 이내로서 표준 체형에서 체격차이는 중요하지 않음을 보여 준다.

Table 4. Equivalent dose rate and effective dose rate for 20 organs calculated for nominal phantom and 15 years in water chamber [mSv⁻¹].

	Nominal phantom	Small phantom
Gonad	17.5	22.6
Marrow	47.5	47.1
Colon	25.2	28.3
Lung	56.3	57.7
Stomach	36.3	40.5
Bladder	23.1	23.7
Liver	35.1	36.6
Esophagus	60.4	55.2
Thyroid	77.0	60.4
Skin	50.1	46.8
Bone surface	51.4	52.5
Adrenal	57.5	40.3
Brain	94.2	94.3
ULI	26.3	27.6
SI	25.9	27.5
Kidney	38.1	38.1
Muscle	44.7	44.6
Pancreas	38.1	36.2
Spleen	43.2	38.9
Thymus	50.5	35.6
Effective dose rate (mSv ⁻¹)	36.2	37.1

개인선량계에 의한 유효선량의 측정성

예시된 증기발생기 수실과 같은 비정규방사선장에서 개인선량계에 의한 감시로 작업자의 유효선량을 근사하게 평가할 수 있을 것인지를 살펴보기 위해 팬텀의 대표적인 위치 즉, 머리, 가슴 및 하복부 3곳(그림8)에서 조사선량률을 계산하고 정규방사선장에 대해 평가된 유효선량환산계수[17]를 이용하여 환산한 값과 위에서 직접 평가한 유효선량을 비교하였다. 이들 대표적 위치에서의 조사선량률은 각각 직경 10 cm의 구형 공기체적을 검출기로 하여 MCNP로 계산하였으며 그 결과는 표 5에서 보는 것과 같다. 머리 위치로서 U튜브 노출면에 근접한 위치에서는 선량률이 11.3 Rh⁻¹는 고리1호기 증기발생기에서 실측된 선량률 11 Rh⁻¹[5]에 근사한 값으로서 위에서 설정한 계산모델이 증기발생기 수실의 방사선장 특성을 평가하는 데에 사용할 수 있음을 보여 준다.

방사선 작업 종사자가 착용하는 개인선량계는 인체에 준하는 물체의 표면에 붙이고 선량계의 정면

으로 입사하는 넓고 평행한 방사선장에 대해 국제 방사선 측정 단위 위원회(ICRU)가 정한 심부선량 Hp(10) 및 표층선량 Hp(0.07)을 기준으로 교정된다. 따라서 만약 방사선 입사각에 대한 개인선량계의 반응이 등방성이라고 한다면 산출된 조사선량률에 위에서 얻은 에너지 분포를 가중환산계수를 적용함으로써 Hp(10)을 근사적으로 얻을 수 있다. 선량계가 비등방성으로 반응한다면 그 선량계의 경사입사교정상수로 보정이 필요할 것이다. 실제에서는 인체 내 각 조직의 선량을 직접 측정할 수는 없기 때문에 각 조직의 등가선량이 Hp(10)보다 작을 것이라는 가정아래 이 심부선량을 보수적인 유효선량으로 간주하게 된다.

위에서 평가된 조사선량률을 에너지 스펙트럼을 반영하여 심부선량으로 환산한 결과가 표 5에 조사선량과 함께 주어졌다. 즉, 머리, 가슴 및 복부의 위치에 대해 각각 119, 71 및 58 mSv⁻¹로서 직접 평가한 유효선량에 비해 상당히 높다. 만약 작업자에게 둘 이상의 복수 선량계를 지급하여 머리, 가슴 및 하복부에서 선량을 측정된 결과에 적절한 가중치를 부여하여 유효선량을 평가하는 복수선량계 알고리즘을 사용한다면 그 결과는 가슴 선량계의 값 주변에 있을 것이므로 개인선량계에 의한 유효선량 평가치는 실질 유효선량에 비해 약 2배가 될 것이다. 즉, 이러한 비정규 방사선장에서는 잘 교정된 개인선량계 시스템을 사용하더라도 유효선량 분포에 대한 적절한 배려가 이루어지지 않는다면 유효선량을 100% 또는 그 이상 과대 평가할 우려가 높음을 의미한다. 실질 유효선량이 선량계로 측정한 선량값보다 크게 낮아지는 이유는 생식선, 위, 결장 등 조직가중치가 큰 조직이 선량률이 낮은 아래쪽으로 치우쳐 있는 점과 하향방사선의 신체 내 투과깊이가 깊어 자체차폐효과가 큰 점을 들 수 있다.

Table 5. Exposure rate and equivalent dose rate at 3 positions(head, chest and abdomen) near the nominal phantom in chamber.

	Exposure rate (Rh ⁻¹)	Equivalent dose rate (mSv ⁻¹)
Head	11.3	119
Chest	6.8	71
Abdomen	5.5	58

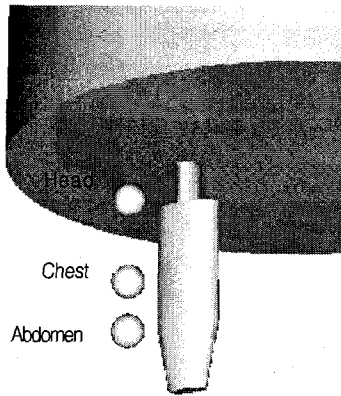


Fig. 8. Three positions where the expcalculation was performed.

결론

PWR 원전의 증기발생기 수실 내부 방사선장의 특성과 수실 작업자의 유효선량을 MCNP4A코드와 MIRD형 성별 수학적 인형팬텀을 이용하여 평가하였다. 수실 내부 방사선장의 에너지 스펙트럼 계산결과를 통해 세관 오염에서 지배적인 ^{60}Co 과 ^{58}Co 의 피크와 저에너지 영역의 산란방사선장이 관찰되었고 극각에 대해 근사적인 코사인분포를 나타내었으며 세관오염에 의해 내려오는 방사선이 지배적으로 나타났다. 표준성인과 작은성인의 유효선량은 각각 38.86mSv^{-1} 와 36.79mSv^{-1} 로서 체격의 영향은 경미했다. 팬텀의 머리, 가슴 및 하복부 위치에서 평가된 조사선량률과 에너지스펙트럼에 대해 ICRU 47에서 주어진 주위선량당량 환산계수를 이용해 평가한 등가선량률은 각각 119, 71, 및 58mSv^{-1} 로 나타났다. 따라서 개인선량계 관독에서 얻는 심부선량 또는 유효선량은 본 연구에서 계산한 유효선량률의 2배 정도가 될 것으로 보인다. 본 연구의 결과를 통해 일반적인 개인선량계의 경사입사 방사선에 대한 과대/과소 평가 특성과 함께 비정규, 고선량을 방사선장에 종사하는 작업자의 선량계측 계획 및 결과의 해석에 매우 신중해야 함을 알 수 있다.

감사의 글

이 연구는 기초전력공학공동연구소의 연구비로 수행되었습니다.

참고문헌

1. International Commission on Radiological Protection, *Recommendation of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 26, Pergamon Press(1977)
2. International Commission on Radiological Protection, *1990 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60, Pergamon Press(1990)
3. International Commission on Radiological Protection, *Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation*, ICRP Publication 74, Pergamon Press(1996)
4. 장재권, 이재기, "점선원 감마선장에서 유효선량의 성별차 및 개인선량당량과의 차이", 방사선방어학회지, 22(4), 299-307(1997)
5. X.G. Xu, W.D. Reece and J.W. Poston, Sr., "A Study of the Angular Dependence Problem in Effective Dose Equivalent Assessment", *Health Phys.*, 68(2), 214-224 (1995)
6. C.H. Kim, W.D. Reece and J.W. Poston, Sr., "Calculation of Effective Doses for Broad Parallel Photon Beams", *Health Phys.*, 76(2), 156-161(1999)
7. 전력연구원, 고리1호기 교체 증기발생기 표면선량률 평가, TM.NO4.S1998.190(1998)
8. W.S. Snyder, M.R. Ford and G.G. Warner, *Estimates of specific absorbed fraction for photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom*, Society of nuclear medicine, New York, MIRD Pamphlet No.5. Revised(1978)
9. M. Cristy, *Mathematical Phantoms for Use in Reassessment of Radiation Dose to Japanese Atomic-Bomb Survivors*, Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM-9487 (1985)
10. M. Zankl, N. Petoussi, and G. Drexler, "Effective Dose and Effective Dose Equivalent - The Impact of the New ICRP Definition for External Photon Irradiation," *Health Phys.*, 62(5), 395-399(1992)
11. M. Zankl, G. Drexler, "An Analysis of the Equivalent Dose Calculation for the Remainder Tissues", *Health Phys.*, 69(3), 346-355(1995)

12. G. Drexler, Verlauf der Ionendosis an Grenzschichten. In *Microdosimetry, Proc. Symp. Microdosimetry*, Ispra, 13-15. EUR3747 d-f-e, European Communities, Brussels(1968)
13. Y.Yamaguchi, "Dose Conversion Coefficients for External Photons Based on ICRP 1990 Recommendations", *Nuclear Science and Technology*, 31(7), 716-725(1994)
14. LANL Group X-6, *MCNP-A General Monte Carlo Code N-Particle Transport Code Version 4A*, LA-12625-M(1993)
15. J.H. Hubbell, W.J. Veigele, E.A. Briggs, R.T. Brown, D.T. Cromer and R.J. Howerton, Atomic Form Factors, Incoherent Scattering Functions, and Photon Scattering Cross Sections, *J. Phys. Chem., Ref.Data* 4, 471(1975)
16. Van Riper, *Sabrina users guide. Los Alamos*, NM: Los Alamos National Laboratory, LA-UR- 93-3696(1994)
17. International Commission on Radiation Units and Measurements, *Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations*, ICRU Report 47, Bethesda, Maryland(1992)