

국내 가압경수로형 원전 계획예방정비기간 주요 방사선작업에 대한 납 차폐복 선량저감효과 분석

김정인*, 이병일*, 임영기†

*한국수력원자력(주) 방사선보건연구원, †가천대학교 방사선학과

2013년 12월 9일 접수 / 2013년 12월 17일 1차 수정 / 2013년 12월 18일 채택

국내 가압경수로형 원전 계획예방정비기간에 수행되는 주요 방사선작업에 대한 감마선 에너지 분포를 측정하였다. 고 방사선구역 작업시 종사자가 착용하는 대표적인 납 차폐복에 대하여 감마선 에너지 분포에 따른 차폐효과를 평가하기 위해 전산모사 방법을 이용하였다. 전산모사는 MIRSD형 인체모형에 추가적으로 납 차폐복을 모델링하고 측정된 감마선 에너지 정보를 이용하여 수행하였다. 주요 방사선작업의 평균 감마선 에너지는 일반적으로 방사선방호 과정에서 적용되는 기준 방사선에너지 보다 낮은 것으로 평가되었다. 방사선 방호 목적을 달성하기 위한 효율적인 납 차폐복 착용을 위해 방사선작업 지역의 방사선에너지 분포평가의 필요성을 확인하였다.

중심어 : 납 차폐복, 계획예방정비, 전산모사, 방사선방호

1. 서론

국제방사선방호위원회(ICRP)에서는 방사선작업종사자의 불필요한 피폭을 방지하고 피폭이 수반될 경우에도 가급적 선량을 최소화하도록 권고하고 있다[1]. 이러한 목적으로 의료분야나 산업분야의 방사선 작업종사자가 일반적으로 가장 많이 사용하는 방법은 납 조끼 혹은 납 치마를 착용하는 것이며 국내 원전에서도 상대적으로 고 방사선 구역에서의 작업이 필요할 경우 종사자의 납 차폐복 착용이 요구되고 있으며 작업의 효율성 개선을 위해 차폐복의 모델도 점차 개선되고 있다.

일반적으로 외부 방사선장에 대한 작업자의 선량평가는 법정 개인선량계인 열형광선량계(TLD)나 필름배지의 관독 값과 고정선장으로부터 구해진 선량환산계수를 이용하는 일련의 알고리즘을 통해 이루어진다[2-4]. 하지만 이러한 선량평가방법은 납 차폐복 착용과 같은 특수한 형태가 아닌 일반적인 경우에만 적용가능하기 때문에 실제 현장에서는 보수적인 접근방법으로 차폐복으로 덮이지 않은 부위에 개인선량계를 착용하거나 차폐복 안쪽과 바깥쪽에 복수개의 선량계를 착용하여 분석하는 방법이 시도되고 있다. 그러나 이러한 시도 역시 납 차폐복 착용에 따른 정확한 선량 저감효과 분석이나 개인선량평가에는 한계가 있다. 따라서 납 차폐복을 착용한 상태에서의 작업자의 선량평가를 위해서는 주어진 피폭환경에 대한 방사선에너지 및 입사방향 등의 정확한 정보가 요구되지만 실제로 이러한 피폭환경에 대한 정보가 없을 경우 기준

방사선장에 의한 보수적 접근방법이 일반적으로 적용되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 국내 원전의 주요 방사선 작업 공간의 방사선 에너지 분포를 측정하고 이에 대한 납 차폐복의 차폐효과를 분석하여 방사선량 측면에서의 납 차폐복 착용에 대한 보수성을 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상작업의 선정

원전 방사선작업별 선량은 종사자 개인선량계인 열형광선량계(TLD)와 보조선량계인 전자식선량계(ADR)에 의한 측정값으로 관리되고 있으며 매년 '원자력발전소 방사선관리연보'에 작업별 선량자료가 집단선량으로 제시된다. 방사선작업은 정상운전, 계획예방정비, 중간정비 등으로 분류되며 그 중 계획예방정비기간의 선량이 전체의 약 80%에 해당하므로 세부작업 분류는 계획예방정비기간의 작업을 대상으로 하였다. 계획예방정비기간의 방사선작업은 관련계통 및 작업특성에 따라 작업코드로 분류되어 매 회 마다 작업별로 선량이 관리된다. 2001년부터 최근까지 작업별 피폭현황을 보면 가동중 검사, 격납건물 누설시험, 계통운전, 방사선안전관리, 폐기물관리 등으로 구성된 작업코드에 해당하는 집단선량이 가장 높은 수치를 기록하고 있으며 다음으로 증기발생기 관련작업, 핵연료 및 원자로 분해작업, 원자로 냉각재펌프, 밸브점검 작업순으로 높은 집단선량을 보였다. 높은 집단선량을 보이는 작업이라도 적은 선량의 다수종사자에 의한 효과가 있

교신저자 : 김정인, neogen21@khnp.co.kr
서울 도봉구 우이천로 308 방사선보건연구원 보건물리연구소

Table 1. Measured Photon Energy Distribution at the Working Area of Selected Jobs during Refueling Outage of Korean PWR Nuclear Power Plants.

job / working area	photon energy (MeV)	
	range	mode (most frequent value)
S/G nozzle dam	0.28 - 0.58	0.48
S/G man-way	0.36 - 0.37	0.37
S/G ECT	0.28 - 0.44	0.35
S/G tube	0.28 - 0.44	0.36
Rx. head PT	0.24 - 0.42	0.30
stud hole inspection	0.40 - 0.56	0.50
Rx. cavity decontamination	0.21 - 0.31	0.26
in site inspection	0.3 - 0.38	0.33
RCP inspection	0.25 - 0.35	0.31
low dose area	0.26 - 0.37	0.30

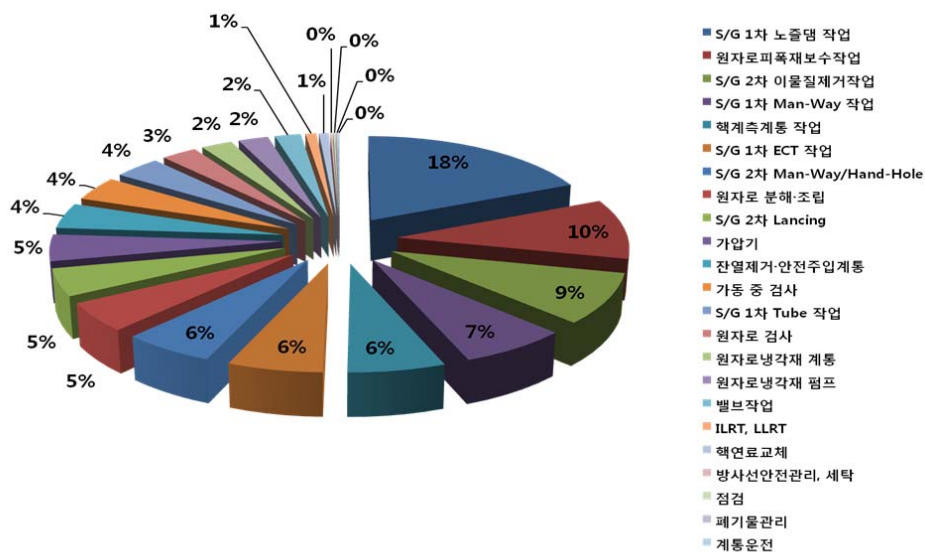


Fig. 1. The personal dose distribution by job types during refueling outage of Korean nuclear power plants (PWR, 2001-2010).

으므로 집단선량을 실제 작업인원으로 나누어 표시하면 Fig. 1과 같이 선량관리 측면에서 중요한 작업이 도출된다. 이러한 통계를 기반으로 10개의 주요 방사선작업을 선정하였다.

2.2. 주요 작업지역 방사선 측정

선정된 작업지역에 대해 NaI 섬광검출기(2"×2")를 장착한 휴대용 핵종분석기(Inspector 1000 + IPRON-2, Canberra)를 이용하여 계획예방정비기간 해당 작업이 이루어지는 시기에 평균 감마선 스펙트럼 에너지를 측정하였다. 종사자가 노출되는 대표 방사선장을 반영하기 위해 위치별 체류시간 및 선량률을 고려하여 측정하였다. 증기발생기 노즐댐 작업시 수실 내부에서의 작업처럼 작업공간이 협소한 이유로 차폐복 착용이 불가한 경우는 제외하고 실제 작업자가 차폐복을 착용할 수 있는 지역에 국한하였다.

2.3. 전산모사

사용된 납 차폐복은 2004년 말 국내 원전에 도입된 앞쪽의 양면을 여미는 방식으로서 2.5 cm×32 cm×0.15 cm 크기의 납판을 지그재그 형식으로 내장하도록 설계되었으며 전면은 이중으로 배치하여 납판의 두께가 3 mm 이고 후편은 1.5 mm의 두께로 설계되어 총 무게는 약 9.3 kg 이다. 전면의 경우 여미는 방식으로 인해 착용 시 납판이 일부 포개지도록 되어있다. Fig. 2는 사용된 납 차폐복의 외관을 보여준다.

납 차폐복을 착용한 인체 모의 피폭체는 MIRD-V 수학적 모의 피폭체를 사용하였다[5]. 본 모의 피폭체는 인체를 단순화한 형태이기 때문에 차폐복의 형태도 피폭체에 맞도록 머리부분과 다리부분을 제외한 가슴부위에 원통형으로 제작하여 피폭체에 밀착되도록 모델링하였다. 실제 차폐복 착용 시 납판이 겹쳐지는 부분은 무시하고 일괄적으로 전면과 후면의 두께를 각각 3 mm와 1.5 mm로 하였으며, 전면의 경우 생식선 차폐를 위해 추가적으로 차폐복을 길게 모델링하였다. Fig. 3은 납 차폐복을 추



Fig. 2. Photographic image of a lead vest used in nuclear power plants.

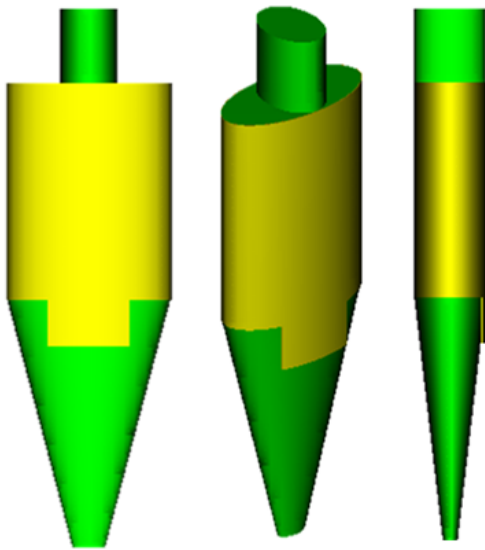


Fig. 3. MIRD-V phantom with lead vest model(middle), front view(right), right side view(left).

가로 모델링한 MIRD-V 모의 피폭체를 보여준다. 구성된 피폭체와 몬테카를로 방사선수송코드인 MCNPX [6]를 이용하여 전면(AP), 후면(PA) 조사방향에 대하여 차폐복을 착용한 경우와 그렇지 않은 경우에 대해 각각 662 keV 감마선에 대한 주요 장기별 선량을 산출하였다. 같은 조건에서의 실측을 위해 표준한국인 실물 모의 피폭체를 사용하였다. 납 차폐복을 착용시킨 실물 모의 피폭체 가슴 부위의 차폐복 외부와 내부에 각각 TLD를 장착하여 ¹³⁷Cs 선장에 노출시켰다. 실제 조사에서는 점 선원이 사용되므로 선원과의 거리를 4 m로 하여 가급적 가슴부위에 평행한 방사선장이 조사될 수 있도록 하였으며 선량이 1 mSv 이상이 될 수 있도록 1 시간씩 5회 조사하고 TLD 선량을 판독하였다. 주요작업별 납 차폐복에 의한 선량저감효과를 평가하기 위해 측정된 주요 작업별 대표 방사선 에너지 분포를 입력 자료로 사용하였다. 납 차폐복의 두께는 추가적으로 0.5, 1, 1.5, 2 mm 로 가정하여 가벼운 형태의 납 차폐복 착용시 선량저감효과를 평가하였다. 기준선장으로 ¹³⁷Cs 선원의 662 keV를 가정하였으며 각 주요 작업별 측정 대

표에너지에 의한 선량을 기준선장 대비 저감율로 평가하였다.

3. 결과 및 논의

휴대용 핵종 검출기를 사용하여 측정된 국내 경수로형 원전의 계획예방정비기간의 주요 방사선작업 공간에 대한 감마선 평균에너지는 Table 1과 같이 해당 작업이 이루어지는 지역의 측정지점별로 다양하게 나타났는데 해당작업의 대표 방사선에너지는 방사선작업이 특정 지점에서만 이루어지지 않으므로 방사선작업자의 체류시간을 고려하여 측정된 가장 많은 빈도수를 나타내는 값으로 정하였다.

Fig. 4는 납 차폐복을 착용한 상태에서의 AP, PA 조사방향에 대한 662 keV광자 에너지에 대한 장기별 선량 전산모사결과를 보여준다. AP 방향에 대해서는 전체적으로 약 20%, PA 방향에 대해서는 10% 이상 대부분의 주요 장기에 대해 차폐효과가 있는 것으로 평가되었다. 머리부분과 갑상선은 차폐복에 의해 차폐가 되지 않으므로 평가에서 제외하였다. 생식선의 경우 전면에서만 차폐복에 의해 차폐가 되므로 PA 방향에서는 선량감소 효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 식도와 피부의 경우는 일부만 차폐복에 의해 차폐가 되므로 상대적으로 주요 장기들에 비해 선량이 적게 감소하는 것으로 평가되었다. MIRD-V 피폭체의 경우 피폭체의 양팔이 몸통 내부에 배치되어 있어 전체적으로 뼈 및 골수 선량이 상대적으로 낮게 평가될 수 있으며 실제 차폐복이 인체를 덮고 있는 부분보다 모델링 된 피폭체의 차폐면적이 넓기 때문에 이 또한 선량의 저평가 요인이 될 수 있다고 생각된다. 그러나 대부분의 주요 장기는 차폐된 영역 내에 포함되며 전산모사에서도 이는 충분히 반영되었으므로 차폐복에 의한 유효선량의 감소는 전산모사 결과와 크게 차이가 나지 않을 것으로 판단된다.

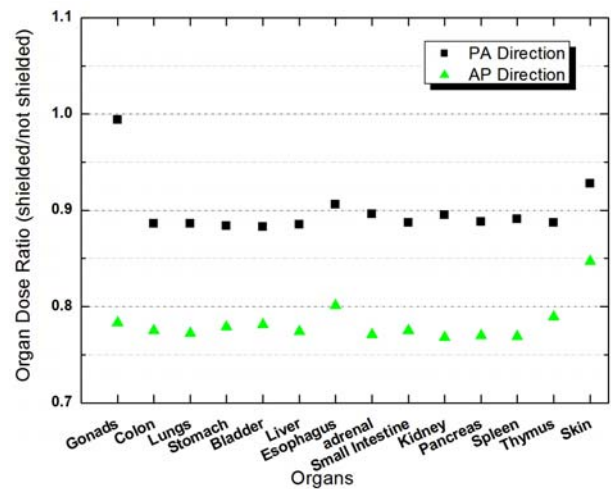


Fig. 4. Dose reduction effects of the lead vest for various critical organs exposed to 662 keV photon.

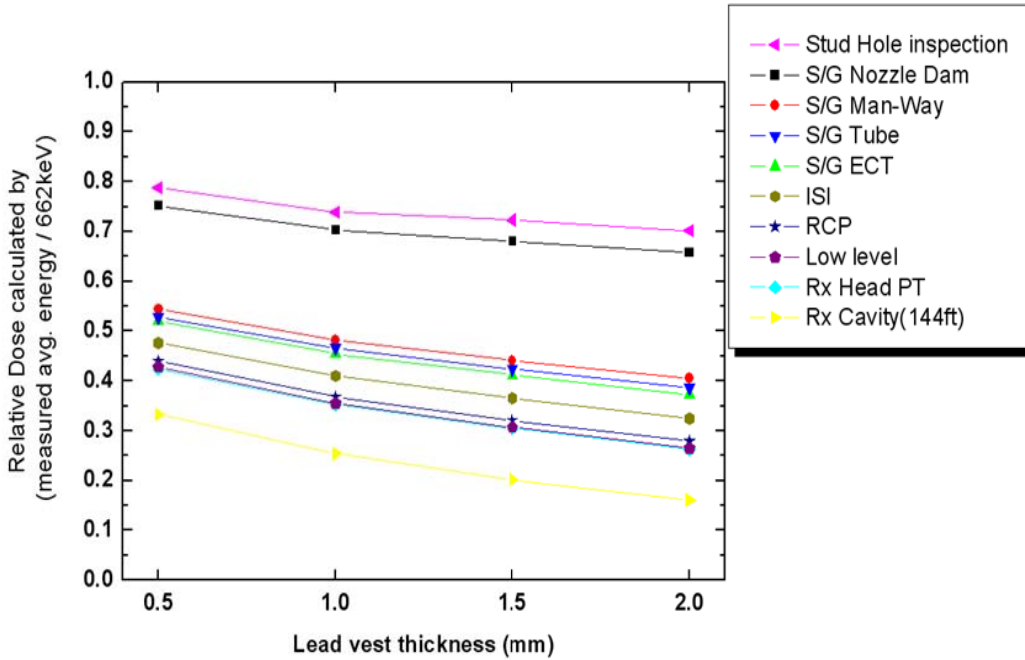


Fig. 5. Dose reduction effects of the lead vest for various jobs/working area in nuclear power plants.

TLD를 착용한 실물 인체 모의 피폭체를 ¹³⁷Cs 선원에 노출시킨 실측 실험 결과 전면 조사에서 차폐복 외부의 선량 값은 1.13±0.04 mSv였으며, 내부의 선량값은 0.85±0.09 mSv로 약 25% 선량이 감소되어 전산모사 결과와 크게 차이가 나지 않음을 확인하였다.

Figure 5에 납 차폐복 두께를 0.5 mm에서 2 mm로 한 MIRD-V 모의 피폭체에 실측한 원전 내 각 작업 환경에서의 광자 에너지 스펙트럼에 대한 기준선장 대비 선량저감 효과 평가결과를 나타내었다. 측정 에너지 스펙트럼의 평균에너지가 낮을수록 실제 차폐복에 의한 선량저감효과는 크게 나타나며 stud hole 점검작업의 경우는 0.5 mm 두께의 납 차폐복에 대하여 약 20 %정도, reactor cavity 공간에 대해서는 최대 80%이상 기준선장대비 선량이 감소되는 것으로 평가되었다.

이러한 선량감소효과 평가결과는 실제로 방사선에너지 분포에 대한 정보가 없을 경우 기준선장으로 가정하여 차폐복을 착용하였을 시 예측된 선량보다 실제 작업후의 선량이 상당부분 더 감소하며 차폐복 착용 시 예측선량이 상당히 보수적으로 평가됨을 보여준다.

본 연구에서는 작업자 개인 수준에서의 선량감소 효과를 평가하였으나 주요 방사선 작업별 선량은 작업자의 집단선량으로 관리되어 차폐복의 착용여부에 대한 선량감소효과를 작업수준으로 평가하는 데에는 한계가 있었으며 향후 이 부분에 대한 추가적인 연구가 필요함을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 원전 내 주요 방사선작업에 대하여 방사선에너지 분포를 측정하고 몬테카를로 방법을 적용하

여 측정 에너지 분포에 대한 납 차폐복 착용 시 기준선장 대비 선량저감 정도를 분석함으로써 납 차폐복 착용의 보수성을 평가하였다.

평가결과는 20%에서 크게는 80%까지 기준선장 대비 선량이 더 감소함을 확인하였으며 이는 납 차폐복 착용이 선량예측에 있어 상당히 보수적일 수 있음을 보여준다.

국내 원전에서는 다양한 형태의 납 차폐체가 선량저감을 목적으로 사용되고 있으며 선량률에 따라 보수적인 기준선장에 대해 차폐가 계획된다. 그러나 무거운 납 차폐복의 착용은 작업효율을 저하시켜 오히려 작업시간을 연장시키는 역효과가 있을 수 있다. 따라서 방사선방호의 최적화 개념에서 접근한다면 방사선에너지 분포에 근거한 적절한 차폐설계가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국수력원자력(주) 방사선보건연구원에서 수행한 원전종사자 주요 방사선작업에 대한 피폭환경평가(NO. E08NJ24) 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. International Commission on Radiation Protection, 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, 2007.
2. International Commission on Radiation Protection, Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation, ICRP Publication 74, 1996.
3. International Commission on Radiation Protection, Conversion coefficients for radiological protection

- quantities for external radiation exposures, ICRP Publication 116, 2010.
- American National Standards Institute, Inc. American national standard for dosimetry - personnel dosimetry performance - criteria for testing. ANSI/HPS N13.11, 2009.
 - Snyder WS, Ford MR, Warner GG. Estimates of absorbed fractions for mono energetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom. MIRDPamphlet No. 5, Revised. Society of Nuclear Medicine, 1978.
 - Los Alamos National Laboratory. MCNPX™ user's manual version 2.6.0, LA-CP-07-1473, 2008.
 - KIM JI et al. Physical phantom of typical Korean male for radiation protection purpose. Radiat. Prot. Dosimet. 2006;118:131-136.

Analysis of a Lead Vest Dose Reduction Effect for the Radiation Field at Major Working Places during Refueling Outage of Korean PWR Nuclear Power Plants

Kim Jeong-In^{*}, Lee Byoung-il^{*}, and Lim Young-khi[†]

^{*}Radiation Health Research Institute of Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd.,

[†]Gachon University

Abstract - The gamma energy distributions at the major working places during refueling outage of Korean PWR nuclear power plants were measured. In order to estimate the dose reduction effect of a lead vest, Monte Carlo calculation method was used. For the simulations, the MIRD-V phantom with a lead vest was formed and exposed to the measured radiation field. The average measured gamma energy is lower than that of standard which is generally applied to radiation protection procedures. For the efficient use of a lead vest and achievement of radiation protection purpose, it is necessary to estimate the energy distribution of radiation field at working places.

Keywords : Lead vest, Refueling outage, Monte Carlo simulation, Radiation protection