



### 저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2015년 2월

박사학위논문

원전 고평폭 비균질 방사선장에서  
종사자의 피폭방사선량 평가알고리즘 개발

조선대학교 대학원

원자력공학과

김희근

# 원전 고평폭 비균질 방사선장에서 종사자의 피폭방사선량 평가알고리즘 개발

Development of the Most Appropriate Algorithm for Estimating  
Personal Dose of Radiation Workers under High Exposure Rate  
and Non-homogeneous Radiation Field in Nuclear Power Plants

2015년 02월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

김희근

원전 고평폭 비균질 방사선장에서  
종사자의 피폭방사선량 평가알고리즘 개발

지도교수 이 경 진

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2015년 2월

조선대학교 대학원

원 자 력 공 학 과

김 희 근

## 김희근의 박사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 정운관 (인)

위원 조선대학교 교수 이경진 (인)

위원 조선대학교 교수 송종순 (인)

위원 조선대학교 교수 나만균 (인)

위원 KINGS 교수 노명섭 (인)

2014년 12월

조선대학교 대학원

# 목 차

요약 .....	iv~vi
제1장 서론 .....	1
제2장 국내원전의 피폭방사선량 현황 .....	5
제1절 국내원전 종사자의 피폭방사선량 현황 .....	5
제2절 종사자 피폭방사선량 평가의 중요성 .....	8
제3장 피폭방사선량 평가기준 .....	10
제1절 피폭방사선량 단위 체계와 유효선량 .....	10
제2절 피폭방사선량 한도와 평가 체계 .....	14
제3절 원전의 피폭방사선량 측정과 선량평가 .....	17
제4장 원전의 방사선피폭 및 방사선장 특성 .....	20
제1절 원전의 방사선피폭 핵종 .....	20
제2절 원전의 방사선장 특성 .....	22
제5장 고피폭 방사선작업의 유효선량 평가 .....	24
제1절 원전의 복수선량계 적용현황 .....	24
제2절 복수선량계 알고리즘 .....	28
제3절 복수선량계 알고리즘 적용시험과 선정결과 .....	32
제4절 개발된 알고리즘의 국내원전 적용경험 .....	43
제5절 ICRP 103 방사선방호 체계와의 적합성 검토 .....	54
제6장 고피폭 접촉작업의 등가선량 평가 .....	62

제1절 말단선량 평가기준과 개인선량계 .....	62
제2절 말단선량계 소자보정 .....	68
제3절 말단선량계 지급조건 결정 .....	74
제4절 고평폭 접촉작업의 방사선장 특성 .....	75
제5절 말단선량 평가 현장시험과 결과 .....	81
제7장 결론 및 제안 .....	86
참고문헌 .....	90
감사의 글 .....	95

## 표 목차

표 2.1 국내원전의 설비현황 .....	6
표 2.2 국내원전 연도별 방사선작업종사자의 수, 집단선량 및 개인선량 .....	7
표 3.1 계획피폭상황에 권고된 선량한도 .....	16
표 3.2 방사선 종류별 성능검사 범주 및 시험방사선 종류 .....	19
표 4.1 원전 주요 부식생성물과 특성 .....	21
표 4.2 국내 원전의 방사선장 측정결과 .....	22
표 5.1 Two-dosimeter Algorithms .....	31
표 5.2 TLD and ADR readouts for the installation of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 2 .....	37
표 5.3 TLD and ADR readouts for the removal of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 2 .....	38
표 5.4 Calculated effective dose equivalents from the installation of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 2 .....	39
표 5.5 Calculated effective dose equivalents from the removal of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 2 .....	40
표 5.6 Summary of Dose Distribution and Difference .....	43
표 5.7 TLD Readouts of Field Tests in 2004–2005 (Installation of a Steam Generator Nozzle Dam at Hanbit NPPs Unit 4 During the Maintenance Period) .....	58
표 5.8 Comparison of calculated EDE and E Based on the TLD Readouts of Field Tests in 2004–2005 (Installation of a Steam Generator Nozzle Dam at Hanbit NPPs Unit 4 During the Maintenance Period) .....	59
표 5.9 Comparison of calculated EDE and E Based on the TLD Readouts of Field Tests in 2006–2007 (Installation of a Steam Generator Nozzle Dam at Hanul Units 1 & 2) .....	60



표 5.10 Comparison of calculated EDE and E Based on the TLD Readouts of Field Tests in 2007 (UT Tests of Coolant Tube Nozzle at Wolsong Unit 1) .....	61
표 6.1 Irradiation categories (ANSI N13.32-1995, performance testing of extremity dosimeters) .....	64
표 6.2 Comparison of DCF results for extremity dosimeters between Harshaw EXTRAD and Panasonic UD-807 .....	73
표 6.3 TLD(Panasonic UD-802) readouts of radiation workers for the maintenance of steam generator nozzle dam at Hanbit NPPs in 2004 ..	78
표 6.4 TLD(Harshaw 8806) readouts of radiation workers who wear TLD on wrist for the maintenance of steam generator at Hanul NPPs in 2009 ..	84
표 6.5 TLD(Panasonic UD-802) Readouts of radiation workers who wear TLD on wrist for the pressure tube replacement at Wolsong NPPs in 2009 ...	85

## 그림 목차

그림 2.1. 국내원전의 방사선안전관리 체계 .....	8
그림 3.1. 방사선방호를 위한 선량 양 체계 .....	13
그림 3.2. 피폭방사선량 평가에 관한 체계도 .....	17
그림 4.1 Dominant contributors to radiation exposure in a pressurized heavy water reactor and its risk .....	20
그림 4.2 Maintenance on the steam generator in a nuclear power plant .....	23
그림 5.1 Source geometry of steam generator .....	24
그림 5.2 Application of a two-dosimeter algorithm for the installation of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 2 .....	41
그림 5.3 Application of a two-dosimeter algorithm for the removal of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 2 .....	42
그림 5.4 TLD readouts for the installation of a steam generator nozzle dam at Kori NPP No. 1 .....	44
그림 5.5 TLD readouts for the penetration test of a reactor head at Kori NPP No. 1 .....	45
그림 5.6 TLD readouts for the installation of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 1 .....	46
그림 5.7 TLD readouts for the plugging and nozzle dam removal of steam generator at Hanbit NPP No. 1 .....	47
그림 5.8 TLD readouts for the ultrasonic test of feeder pipe at Wolsong NPP No. 1 .....	48
그림 5.9 Comparison of the maximum, minimum, and calculated deep dose from TLD readouts for the installation of a steam generator nozzle dam at Kori NPP No. 1 .....	49
그림 5.10 Comparisons of the maximum, minimum, and calculated deep dose from TLD readouts for a penetration test of a reactor head at Kori NPP No. 1 .....	50

그림 5.11 Comparisons of the maximum, minimum, and calculated deep dose from TLD readouts for the installation of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 1 .....	51
그림 5.12 Comparisons of the maximum, minimum, and calculated deep dose from TLD readouts for the plugging and nozzle dam removal of steam generator at Hanbit NPP No. 1 .....	52
그림 5.13 Comparisons of the maximum, minimum, and calculated deep dose from TLD readouts for the ultrasonic test of feeder pipe at Wolsong NPP No. 1 .....	53
그림 6.1 Harshaw DXTRAD extremity dosimeter .....	65
그림 6.2 Harshaw EXTRAD extremity dosimeter .....	66
그림 6.3 Panasonic UD-807 dosimeter and readout case .....	67
그림 6.4 Process of ECF generation .....	69
그림 6.5 Distribution of ECF generation for Harshaw EXTRAD dosimeters .....	70
그림 6.6 Distribution of ECFs generated for Panasonic UD-807 dosimeters .....	71
그림 6.7 Phantom geometry .....	72
그림 6.8 Simple geometry of steam generator water chamber .....	77
그림 6.9 Dose calculation algorithm for Panasonic TLD (Gamma branch) .....	79
그림 6.10 Panasonic TLD Structure .....	80
그림 6.11 Harshaw TLD Structure .....	83

## ABSTRACT

### Development of the Most Appropriate Algorithm for Estimating Personal Dose of Radiation Workers under High Exposure Rate and Non-homogeneous Radiation Field in Nuclear Power Plants

Hee Geun Kim

Advisor : Goung Jin Lee

Department of Nuclear Engineering  
Graduate School of Chosun University

The application of a two-dosimeter system with its algorithm, as well as a test of its use in an inhomogeneous high-radiation field, is described in this paper. The goal was to improve the method for estimating the effective dose equivalent (EDE) or effective dose (E) during maintenance periods at Korean Nuclear Power Plants (NPPs). The use of this method in Korean and international NPPs, including those NPPs in the USA and Canada, was also investigated. The algorithms used by the American National Standards Institute, Lakshmanan, the National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), the Electric Power Research Institute and Kim were extensively analysed as two-dosimeter algorithms (TDAs). Their possible application to NPPs was evaluated using data for each algorithm from two-dosimeter results that were obtained from an inhomogeneous high radiation field during maintenance periods at Korean NPPs. The NCRP (55/50) algorithm was selected as an optimal two dosimeter algorithm for Korean NPPs by taking into account the field test results and the convenience of wearing two dosimeters.

In Korea, the ICRP 60 recommendations have been fully implemented to the Korean atomic energy law for nation-wide radiation safety regulations since 2003.

As a protection quantity, the E based on the ICRP 60 recommendation has been used for dose assessment of radiation workers. The selected TDA in this paper, the NCRP (55/50) algorithm, was reflected in standard procedures of Korean NPPs at the end of 2005. As a result, this TDA has been implemented extensively to all Korean NPPs since 2006. In 2007, the ICRP published the ICRP 103, which provides the revised weighting factors for both radiation and tissues and the new reference phantom. In this paper, the applicability of current NCRP (55/50) algorithm at Korean NPPs for ICRP 103 was also analyzed. As a result, it was found that the NCRP (55/50) algorithm is still effective to estimate the E of workers under ICRP 103. It is, thus, considered that the NCRP (55/50) algorithm can be well enough to estimate the E as well as EDE with the same coefficients taking into account the results of this paper.

Workers who maintain the water chambers of steam generators during maintenance periods in NPPs have a higher likelihood of high radiation exposure, even if they are exposed for a short period of time. In particular, it is expected that the hands of workers would receive the highest radiation exposure as a consequence of hand contact with radioactive materials. In this paper, the current status of extremity dosimetry at Korean NPPs was investigated. Although individual NPPs maintain some extremity dosimeters (EDs) for workers who handle radioactive materials, their use was not common and extremity monitoring requirements were not standardized. In this paper, field tests using thermoluminescent dosimeters (TLDs) and EDs were performed during outages at both a pressurized water reactor (PWR) and a pressurized heavy water reactor (PHWR) to evaluate the equivalent dose to the extremities (particularly the hands).

In this paper, the element correction and the personal dose equivalent response for two types of EDs, Harshaw EXTRAD dosimeters and Panasonic UD-807 dosimeters, which are currently available at Korean NPPs, were calculated by calibration and

irradiation tests. Finally, on the basis of the results of calibration, irradiation, and radiation field tests, the application of element correction and personal dose equivalent response to EDs for radiation workers at Korean NPPs was evaluated in terms of practical use.

To provide information about the extremity dose during an outage at both a at PWRs and PHWRs in Korea, several field tests were conducted using an ED, whole-body TLD and an electronic dosimeter. In the field tests, radiation workers were required to wear an ED on the finger, a whole-body TLD on the wrist, two whole-body TLDs on the chest and the back and electronic dosimeters on the chest and the back. As a result of the tests, the extremity dose at the finger was 50 % higher than the E based on the TLD readouts for the chest and the back. In the case of the equivalent dose at wrist, it was 20 % higher than the E. Furthermore, it was found that most extremity doses were low compared with their annual dose limits. Thus, it is expected that the use of EDs at Korean NPP will not be demanded as much as the use of whole-body dosimeters. In this paper, it was also observed that inhomogeneous radiation fields for contact operations at NPPs were dominated by high-energy photons.

The previous provisional conditions of EDs were not standardized and differed depending on the individual NPP in Korea. In this paper, it was suggested new provisional conditions of EDs where the extremity dose was expected to exceed 10 % (50mSv) of the annual dose limit on the basis of the guidelines of the Institute of Nuclear Power Operations and World Association of Nuclear Operators. Finally, the Korea Institute of Nuclear Safety, the Korean nuclear regulatory body, determined the requirement for provisional conditions of EDs to radiation workers for tasks in which the dose to extremities is expected to be 25 mSv in a single access to the radiation controlled area or 50 mSv in a single task taking into account the proposal of Korean NPPs.

## 제1장 서론

고리 1호기 원전이 국내에서 1978년 최초로 가동된 이후, 가동 원전의 수가 지속적으로 늘어나, 2013년 말 기준으로 고리, 월성, 한빛과 한울 등 4개 원전 부지에 23기의 원전이 운전 중에 있다[1]. 이에 따라 국내원전의 발전설비 용량은 1978년 587 MWe에서 2013년 말에 20,716 MWe로 증가되었다. 이에 비례하여 원전에서 생성되는 전력량은 국내 전체 발전량의 약 30% 이상을 점유하고 있다[1,2]. 가동되는 원전의 증가에 맞물려 원전에 출입하는 방사선작업종사자의 수가 지속적으로 늘어나고 있으며, 또한 이들 종사자의 전체 피폭방사선량이 점차 증가하는 추세이다. 2013년 말 기준으로 약 15,000명 내외의 종사자가 원전에서 방사선작업에 종사하고 있다. 이에 따라 이들 종사자의 피폭방사선량은 10,000~15,000 man-mSv 수준에 이르고 있다[1]. 이러한 점을 종합적으로 고려해볼 때 원전에 근무하는 방사선작업종사자의 정확한 피폭방사선량 평가는 무엇보다도 중요한 사항으로 자리매김하고 있다.

피폭방사선량 평가에 관한 기술은 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection : ICRP) 태동과 더불어 발전하여 왔다. ICRP는 유엔방사선영향과학심의위원회(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation : UNSCEAR) 등이 발행하는 방사선에 의한 발암위험도 평가 결과를 근거로 방사선작업종사자에 대한 방사선방호에 관한 권고(Recommendations)를 지속적으로 발행하고 있다[3]. 한편 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency : IAEA)는 ICRP 권고를 근간으로 회원국이 방사선방호 실무에서 쉽게 적용할 수 있도록 방사선방호에 관한 기본안전기준(Basic Safety Standard: BSS)을 순차적으로 발행하고 있다[4]. 이에 따라 각 국가에서는 ICRP 권고와 IAEA 기본안전기준을 바탕으로 자국의 법령에 반영하고 있고, 국내에서도 ICRP 방사선방호 지침과 체계가 실무에서 이행되도록 조치가 이루어지고 있다[5,6]. 예를 들어, ICRP는 1991년 ICRP 26 권고의 방사선방호 체계를 바꾸어 ICRP 60 권고를 발간하였다[3]. 이에 따라 IAEA는 1996년 ICRP 60 권고를 방사선방호 실무에서 쉽게 이용 가능하도록 과거 BSS를 개정하여 발간하였다[4]. 또한 세계 각국에서는 ICRP 60과 BSS를 근간으로 자국의 원자력법에 반영하는 조치를 취하였다[5,6]. 국

내에서도 원자력안전위원회(구 교육과학기술부)와 한국원자력안전기술원(KINS)을 중심으로 ICRP 60의 국내 제도화를 위한 연구를 시행하였고, 2003년 1월부터 국내 원자력 법령에 반영하여 전면적으로 시행중에 있다[5,6].

한편 ICRP는 과학과 기술의 진보 등을 반영하여 ICRP 60을 대체하는 ICRP 103 권고를 2007년에 발행하였다[7]. 이에 따라 ICRP 103의 경우도 IAEA에 의해 BSS 개정 작업이 진행 중에 있다. 2013년 말 현재 IAEA는 ICRP 103에 근거한 새로운 BSS를 확정된 상태로서, 유엔 산하의 세계보건기구(WHO)와 국제노동기구(ILO) 등과 협의를 통해 2014년 말 이전 BSS 발간을 서두르고 있다[5].

피폭방사선량의 평가를 위한 단위는 유효선량(Effective dose)이 사용되고 있다. 유효선량은 ICRP 60에서 도입된 단위로, 방사선 가중치와 인체 조직 가중치를 고려하여 합산한 양으로, 전신이 받는 피폭방사선량을 말한다[3]. 한편, 국제방사선단위측정위원회(ICRU)는 ICRP 60의 유효선량에 대해 다양한 검토를 거쳐 방사선방호 실무에서는 인체 10 mm 깊이에서의 개인선량당량(Personal dose equivalent, Hp(10))을 이용하여 유효선량을 평가하도록 결정하였다[8]. Hp(10)은 신체 10 mm 깊이의 인체 조직이 받는 피폭 방사선량으로 정의된다. Hp(10)은 거의 모든 방사선과 에너지에서 유효선량에 비해 보수성을 갖기 때문에 실무적으로 유효선량을 대신하는 유용한 단위로서 사용되고 있다[8]. 국내 고시에 따르면 Hp(10)은 심부선량(Deep dose)이라는 용어로 정의되어 동일한 의미로 사용되고 있다. 원전에서 작업종사자의 심부선량은 인체조직 10 mm 두께와 동등한 필터 두께를 장착한 열형광선량계(Thermoluminescent dosimeter: TLD)를 이용하여 평가하고 있다[9].

Hp(10)을 정확히 평가하기 위해서는 방사선작업종사자의 신체에 피폭되는 방사선의 종류와 에너지, 그리고 신체의 각 장기별 피폭 방사선량을 정확히 알고 있어야 한다. 그런데 원전에서는 방사화부식생성물, 핵분열생성물 등 다양한 방사선원이 존재하므로 방사선작업에서 작업종사자는 여러 종류의 방사선에 피폭을 받게 된다. 더욱 같은 종류의 방사선 중에서도 다양한 에너지를 갖는 방사선에 의해 피폭을 받게 된다. 더구나 인체에 입사하는 방사선도 단순 정렬된 방사선장이 아니고, 방사선이 종사자의 신체로 입사하는 방향도 여러 방향으로 혼재되어 있는 비균질한(Non-homogeneous) 방사선장이다[7,9].



특히 국내 원전의 계획예방정비기간 중에 행해지는 증기발생기 수실, 원자로 냉각재 펌프 보수 및 가압기 관련 작업 등은 매우 높은 방사선량률을 나타내는 지역으로 짧은 시간 동안의 작업에도 불구하고 높은 방사선량을 피폭 받을 가능성이 있다[10].

그런데, 과거 국내 원전에서 계획예방정비기간 고평폭이 예상되는 비균질한 고평방사선량률 작업조건에서 심부선량을 평가하는 과정에는 몇 가지 문제점을 내포하고 있었다 [10,11]. 먼저 고평폭 예상 작업에 다수의 개인선량계를 지급하여 종사자가 받는 피폭방사선량을 정확히 평가하고자 했으나, 원전별로 추가로 지급하는 개인선량계 지급 조건이 명확하게 정립되어 있지 못하였다. 이 경우 추가로 지급되는 개인선량계는, 증기발생기 수실 내에서도 같이 입사하는 방사선량률이 상하로 형성되는 방사선조건을 주로 고려하여, 주로 가슴과 머리에 패용하였다[10,11]. 그런데 방사선원이 머리 위쪽 부분이 아닌 종사자의 뒤쪽이나 앞쪽에 위치할 경우 피폭방사선량을 정확하게 평가하지 못할 소지가 있다. 또한 지급된 개인선량계 판독값 상호간에 중요성(가중치)을 고려하지 않고 최대선량을 심부선량으로 평가하고 있어, 보수적으로 과대평가하고 있었다[10,11].

이러한 문제점을 개선하고자 다양한 연구를 수행하였다. 먼저, 국내원전 계획예방정비기간 비균질한 고평방사선량률 작업조건의 방사선장 특성을 분석하였다. 두 번째, 고평폭 비균질한 작업에서 종사자에게 지급하는 다수의 개인선량계(본 논문에서는 “복수선량계”라는 표현을 사용함) 피폭방사선량 평가 알고리즘 현황을 조사하였다. 통상 복수선량계는 2개의 TLD로 피폭방사선량을 측정하는 다음 이들 TLD 판독값의 가중치를 고려하여 유효선량을 평가하는 방식을 취하게 된다. 세 번째, 복수선량계 지급조건을 원전의 피폭방사선량 분석 자료를 근거로 결정하였다. 네 번째, 복수선량계 패용 위치를 정하고자 고평폭 예상 방사선작업종사자를 대상으로 3개의 개인선량계를 가슴, 머리, 등에 패용하여 TLD를 판독하였고, 이를 바탕으로 최적의 복수선량계 알고리즘을 결정하고, 원전절차에 반영하였다[10]. 다섯 번째, 선정된 복수선량계 알고리즘을 국내원전에서 약 3년 동안 적용한 운용 경험을 분석하였다[12]. 마지막으로 원전에서 기 적용 중에 있는 복수선량계 알고리즘에 대해 ICRP 103 권고의 발행에 따라 ICRP 103의 적합성을 정량적으로 검토 제시하였다[13,14].

한편 계획예방정비기간 방사성물질과 접촉하는 손이나 발 등은 매우 높은 방사선량을

피폭 받을 수 있다. 이에 따라 ICRP 60과 IAEA의 BSS에서는 손과 발에 대한(이 논문에서는 “말단”이라 칭함) 등가선량(Equivalent dose) 한도를 별도로 정하고 있다[3,4,7]. 이에 따라 미국원자력발전자협회(Institute of Nuclear Power Operators : INPO), 세계원자력발전자협회(World Association of Nuclear Operators : WANO)에서는 방사성물질과 접촉할 가능성이 높은 신체 부위(구체적으로 손가락을 말함)에는 말단선량계를 이용하여 손과 발이 받는 등가선량을 평가하도록 권고하고 있다[15,16]. 이러한 점을 반영하여 국내원전의 피폭방사선량 평가 절차에서도 말단선량계를 패용할 조건과 선량평가 방법을 기술하고 있었으나, 말단선량계 지급조건의 불일치, 피폭방사선량평가 방법의 차이, 말단에 대한 등가선량의 관리방법의 혼재 등 많은 문제점을 내포하고 있었다. 이에 따라 말단선량계를 이용한 피폭방사선량 평가체계를 개발하였고, 원전 방사선량 평가 실무에서의 적용성을 높이기 위한 다양한 분석이 이루어졌다[17-19].

먼저, 원전 고피폭 방사선량이 예상되는 접촉 작업에 대한 등가선량 평가기준 등을 검토하여 원전 절차와의 적합성을 확인하였다. 두 번째, 말단선량계의 방사선학적 반응특성을 분석하였고, 말단선량계의 소자보정시험을 실시하였다[17]. 세 번째, 말단선량계의 지급조건을 결정하였고, 네 번째, 방사성물질과 접촉하는 작업의 방사선장 특성을 다양한 조사와 시험을 통해 분석하였다[18]. 이를 위해 실제 원전 계획예방정비 기간 종사자의 가슴, 등, 손목 그리고 손가락에 TLD를 패용하여 입사방사선장을 평가하였고, 피폭방사선량 평가와 연계하였다[18]. 마지막으로 고피폭 예상 접촉작업에서 시범적으로 말단선량계를 패용하여 손가락이 받는 말단선량을 평가하였다[19]. 이러한 결과에 따라 원전종사자의 말단선량 평가 방법을 최종 확정하였고, 이를 근거로 원전의 피폭방사선량 평가 절차를 개정하였다.

한편 이 연구결과와 신뢰성과 활용성을 확보하기 위한 다양한 시도가 이루어졌다. 연구결과와 국내전문가와 원전실무자 등의 의견을 여러 차례 수렴하였고, 규제기관 및 관련자에게 수차례 설명을 통해 규제 적합성을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 원전종사자 피폭방사선량 평가절차에 반영하였다. 이 결과는 KINS 규제지침에도 반영되었다[20]. 한편, 해외 SCI 저널에 게재를 통해 피폭방사선량평가의 신뢰성을 확보함은 물론 국내원전의 방사선안전관리 기술수준을 제고하는 데 크게 기여하였다.

## 제2장 국내원전의 피폭방사선량 현황

### 제1절 국내원전 종사자의 피폭방사선량 현황

국내원전은 1978년 고리 1호기가 최초로 가동된 이후, 지속적인 전력수요의 증가에 따라 가동되는 원전의 수가 늘어나고 있다. 2013년 말에는 고리, 월성, 한빛과 한울 등 4개 원전 부지에 총 23기의 원전이 상업운전 중에 있다[1]. 이에 따라 원전의 발전설비 용량은 1978년 587 MWe에서 2013년 말에 20,716 MWe로 증가되었고, 원전에서 생성되는 전력량은 국내 전체 발전량의 30 % 이상을 점유하고 있다[1,2]. 표 2.1에 국내 운영 중인 원전의 설비현황을 나타내었다.

국내원전에서는 고리 1호기 가동이후 원전에 출입하는 종사자의 수는 원전 가동 호기수의 증가에 따라 지속적으로 늘어나고 있는 추세이다. 2013년도에 원전에 출입한 종사자는 14,786명으로 집계되었다[1]. 표 2.2에 원전 가동이후 국내원전에 출입한 종사자의 수를 나타내었다. 원전 호기수의 증가에 따라 원전에 출입하는 전체 종사자의 수와 총 집단선량이 늘어나는 경향을 보이고 있다. 한편, 원전 호기별 집단선량과 개인선량은 원전 가동 초창기에는 증가하는 경향을 보였으나, 2000년대 이후 지속적으로 감소하는 경향을 보이고 있다[1]. 이러한 배경에는 원전종사자의 피폭방사선량을 줄이기 위한 지속적인 저감 대책의 추진에 따른 결과로 판단되었다[21].

국내원전 종사자의 집단선량(Collective dose)은 1978년 1,291 man-mSv에서 2013년 12,122 man-mSv로 늘어났다[1]. 원전종사자의 개인선량은 원전 가동이후 지속적으로 감소하여 2013년 0.82 mSv/인 수준으로 나타나고 있다. 표 2.2에 원전 가동이후 국내원전 종사자의 집단선량과 개인선량 분포를 나타내었다.

국내원전 종사자의 피폭 방사선량은 대략 80 % 정도가 계획예방정비기간 중에 발생하고 있다[1,21]. 따라서 종사자의 피폭을 줄이기 위해 계통 방사선원저감, 신설비 도입, 방사선관리 절차 개선 등 장기적인 피폭저감 대책이 수립되어 추진되고 있다[21].

1998년에는 고리1호기의 증기발생기(Steam generator)를 신형으로 교체하였고, 2012년에는 한울 1호기의 증기발생기를 교체하였다[1]. 또한 20년 이상 가동되고 있는 원전의 증기발생기를 신형으로 교체할 계획을 가지고 있다[22]. 이에 따라 종사자의 피폭은 원전의 가동연수 증가에도 불구하고, 현재의 상태를 유지하거나, 미세한 수준이나마 지속적으로 감소될 것으로 예상되고 있다[21].

표 2.1 국내원전의 설비현황

발전소명	용량 (MWe)	노 형	운영허가일 (최초임계일)	운전 예상 종료일	운영 허가기간	
고리	1호기	587	가압 경수로	('77. 6.19)	'17. 6.18	30년후, 계속운전10년
	2호기	650	"	('83. 4. 9)	'23. 4. 8	40년
	3호기	950	"	'84. 9.29	'24. 9.28	40년
	4호기	950	"	'85. 8. 7	'25. 8. 6	40년
신고리	1호기	1,000	"	'10. 5.19	'50. 5.18	40년
	2호기	1,000	"	'11.12. 2	'51.12. 1	40년
월성	1호기	679	가압 중수로	('82.11.21)	'12.11.20	30년후, 계속운전 심사중
	2호기	700	"	'96.11. 2	'26.11. 1	30년
	3호기	700	"	'97.12.30	'27.12.29	30년
	4호기	700	"	'99. 2. 8	'29. 2. 7	30년
신월성	1호기	1,000	가압 경수로	'11.12. 2	'51.12. 1	40년
한빛	1호기	950	"	'85.12.23	'25.12.22	40년
	2호기	950	"	'86. 9.12	'26. 9.11	40년
	3호기	1,000	"	'94. 9. 9	'34. 9. 8	40년
	4호기	1,000	"	'95. 6. 2	'35. 6. 1	40년
	5호기	1,000	"	'01.10.24	'41.10.23	40년
	6호기	1,000	"	'02. 7.31	'42. 7.30	40년
한울	1호기	950	"	'87.12.23	'27.12.22	40년
	2호기	950	"	'88.12.29	'28.12.28	40년
	3호기	1,000	"	'97.11. 8	'37.11. 7	40년
	4호기	1,000	"	'98.10.29	'38.10.28	40년
	5호기	1,000	"	'03.10.20	'43.10.19	40년
	6호기	1,000	"	'04.11.12	'44.11.11	40년

표 2.2 국내원전 연도별 방사선작업종사자의 수, 집단선량 및 개인선량

년도	가동 원자로 (호기)	방사선작업종사자 (명)	집단선량 (man-mSv)			호기 평균 집단선량 (man-mSv/호기)	개인 평균선량 (mSv/인)
			경상기간	계획예방 정비기간	소계		
1977	0	259	218	0	218	218	0.84
1978	1	523	1,291	0	1,291	1291	2.47
1979	1	646	1,039	2,429	3,468	3468	5.37
1980	1	607	2,237	0	2,237	2237	3.69
1981	1	770	1,737	3,057	4,794	4794	6.23
1982	1	785	1,374	3,241	4,615	4615	5.88
1983	3	1,689	1,725	3,513	5,238	1746	3.10
1984	3	2,412	2,285	4,642	6,927	2309	2.87
1985	4	3,504	2,682	6,786	9,468	2367	2.70
1986	6	5,459	5,023	7,214	12,237	2039	2.24
1987	7	5,422	3,670	8,654	12,324	1761	2.27
1988	8	6,639	3,024	17,786	20,810	2601	3.13
1989	9	6,375	3,420	11,298	14,718	1635	2.31
1990	9	7,111	2,599	12,291	14,890	1654	2.09
1991	9	6,432	2,525	5,662	8,187	910	1.27
1992	9	5,453	3,062	8,492	11,554	1284	2.12
1993	9	5,302	2,742	8,723	11,465	1274	2.16
1994	9	5,462	2,636	8,286	10,923	1213	2.00
1995	10	7,445	3,308	9,540	12,848	1285	1.73
1996	11	6,357	3,235	8,473	11,708	1064	1.84
1997	12	8,149	2,723	7,306	10,029	836	1.23
1998	14	9,253	2,355	12,145	14,500	1036	1.57
1999	15	8,426	2,786	9,898	12,684	846	1.51
2000	16	8,058	1,811	9,583	11,394	712	1.41
2001	16	8,331	2,181	8,571	10,752	672	1.29
2002	17	8,346	2,671	6,644	9,315	548	1.12
2003	18	8,741	2,756	7,532	10,288	572	1.18
2004	19	9,867	2,627	10,398	13,025	686	1.32
2005	20	9,810	2,607	9,323	11,930	597	1.22
2006	20	10,154	2,976	7,982	10,958	548	1.08
2007	20	11,366	1,791	11,016	12,807	640	1.13
2008	20	10,840	2,102	8,035	10,137	507	0.94
2009	20	11,723	1,603	14,717	16,320	816	1.39
2010	20	13,236	1,244	14,613	15,857	793	1.20
2011	21	14,691	1,182	9,992	11,174	532	0.76
2012	23	14,715	1,280	9,191	10,471	455	0.71
2013	23	14,786	1,302	10,820	12,122	527	0.82

## 제2절 종사자 피폭방사선량 평가의 중요성

원전에서 방사선작업종사자로 지정을 받기 위해서는 건강검진과 20시간의 방사선방호 교육을 이수해야 한다[23]. 한편 방사선작업종사자 지정 이후에는 매년 6시간의 방사선방호에 관한 재교육을 받아야 한다[23]. 또한 방사선작업 수행 전에는 전신계측(Whole Body Counting)과 뇨시료 중의 삼중수소 검사를 통해 내부피폭 여부를 확인하고 있다[23]. 한편, 원전에서는 방사선방호 교육과 내부피폭 검사가 완료되면 개인선량계를 지급하고, 원전의 방사선관리구역에 출입할 수 있다. 그림 2.1에 국내원전의 방사선안전관리 체계를 나타내었다.

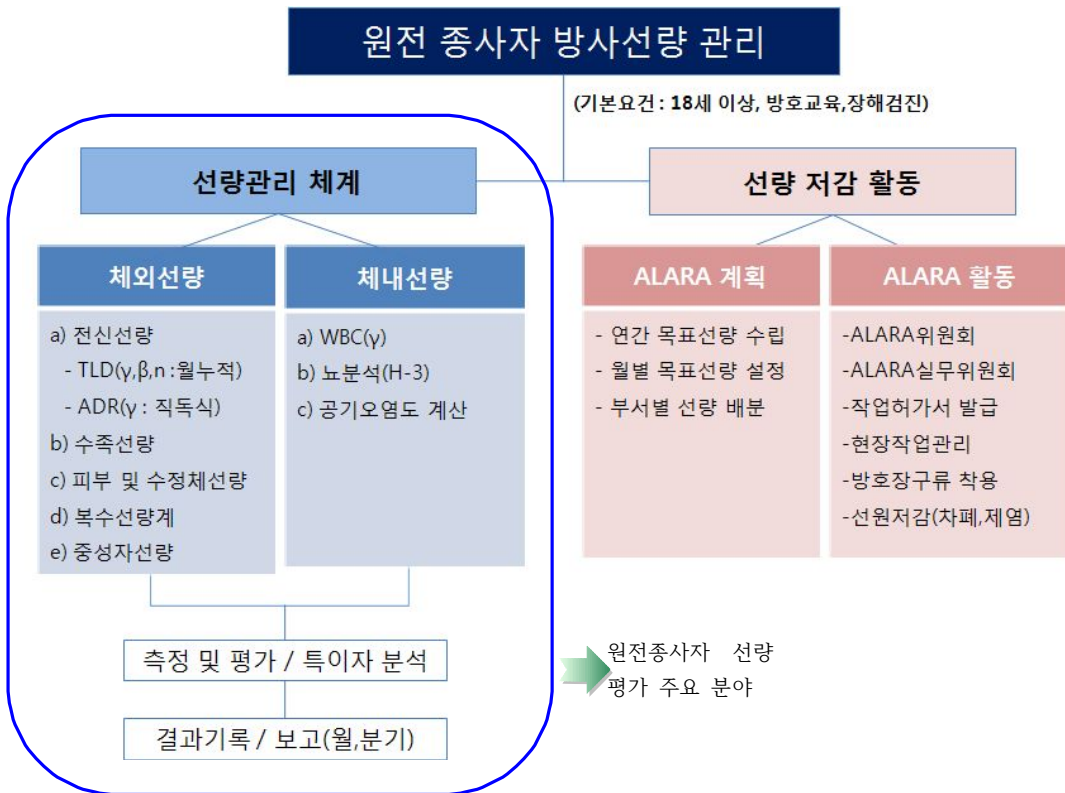


그림 2.1. 국내원전의 방사선안전관리 체계

국내원전 종사자의 피폭방사선량은 주선량계로서 열형광선량계(Thermoluminescent Dosimeter : TLD)를 이용하여 월 단위로 판독하여 유효선량을 평가하고 있다[10,21]. 여기에서 유효선량은, 서론에서 기술한 바와 같이, 인체조직 10 mm 깊이에서 받은 개인선량당량을 말하며, Hp(10)으로 표시한다. 그런데, TLD는 종사자가 받는 피폭방사선량에 대한 즉시 판독이 어렵고, 출입관리 기능이 없는 단점이 있다. 이에 따라, 즉시 판독과 출입관리 기능을 갖춘 전자식개인선량계(Electronic Personal Dosimeter (EPD) 또는 Auto Dosimetric Reader(ADR)로 표기하기도 함)를 보조선량계로 병행하여 이용하고 있다[10,21]. 한편, 원전의 정상운전 중에 원자로건물의 출입에 따른 중성자 선량을 평가하기 위해 TLD 외에 중성자 측정·휴대용 계측장비나 중성자 EPD를 채용하기도 한다. 한편 방사성물질과 접촉하는 손·발이 받는 등가선량을 평가하기 위해서 말단선량계(Extremity Dosimeter)를 드물게 채용하기도 한다[18,19].

원전 방사선작업종사자의 피폭방사선량은 매월 산출되며, 발전소별로 적절한 선량추적·관리·검토(Dose tracking system)를 거쳐 최종 확정된다. 이렇게 확정된 피폭방사선량은 분기별로 국가가 관리하는 국가방사선작업종사자안전관리센터(KISOE)에 영구적으로 보존된다[23]. 이 경우 전신계측을 통해 산출된 내부피폭 방사선량이나 중수로원전에서 발생하는 삼중수소에 의한 내부피폭 방사선량은 외부피폭 방사선량에 합산하여 관리하고 있다[21].

이러한 방사선피폭 기록은 출입기록 등과 함께 개인 별로 영구 보존된다[21]. 개인의 방사선피폭기록은 방사선피폭에 의한 발암위험도를 계산하는 척도로 이용된다. 또한 방사선피폭에 의한 발암에 따른 직업병 인정 등과 같은 법적인 분쟁 시에는 종사자의 발암 확률을 계산하는 근거로 이용되기 때문에 중요한 기록으로 유지된다. 이러한 방사선피폭 기록은 정확하게 평가하여야 함은 물론 법적으로 요구되는 품질조건을 준수해야 한다. 개인선량계 성능시험조건과 내용에 대해서는 제3장 제3절에서 기술한다. 국내에서도 방사선피폭에 의한 발암을 직업병으로 인정해달라는 소송 등이 수차례 제기된 바 있어, 정확한 피폭방사선량 평가는 무엇보다도 중요하다 할 수 있다.

## 제3장 피폭방사선량 평가기준

### 제1절 피폭방사선량 단위 체계와 유효선량[7,24]

흡수선량(Absorbed dose ; D)은 방사선방호를 위한 기본적인 물리량이다. 이는 조직의 체적에 부여된 에너지 분포의 평균으로 정의된다. 흡수선량은 물질의 어느 지점에서든 잘 정의되며 측정 가능하다. 방사선방호에서 중요한 낮은 선량 영역에서 특히 높은 LET 방사선 피폭의 경우 에너지부여 분포는 비균질하다. 실제 적용에서는 장기나 조직 체적 전체에 걸쳐 흡수선량을 평균한다. 장기나 조직 내 흡수선량 평균값이 낮은 선량 영역에서 확률론적 영향의 방사선 위해와 상관된다고 가정한다. 인체조직과 장기 내 흡수선량 평균과 그들의 가중 합이 방호량 정의의 기초가 된다. 흡수선량에서 출발하는 또 다른 방호량인 등가선량(Equivalent dose :  $H_T$ )은 아래와 같이 정의된다.

$$H_T = \sum w_R D_{T,R} \quad (3.1)$$

여기서  $w_R$  은 방사선 R의 방사선가중치이다.  $w_R$  값은 낮은 선량에서 여러 종류 방사선의 생물학적효과비(RBE)에 대한 실험적 데이터 및 생물·물리학적 고려와 판단에 기초를 둔다. 또한  $D_{T,R}$ 은 종류 R인 방사선으로 인한 장기나 조직 T에서 평균 흡수선량을 나타낸다.

유효선량(E)의 원론적 정의는  $w_T$  조직가중치와 그 조직이 받는 등가선량  $H_T$  곱의 합으로 표시된다. 여기서  $w_T$  값은 연령과 성별에 대한 평균이다. 따라서 E는 개인별로 계산하지 않고, 기준인(Reference person)에 의해 계산된다.

$$E = \sum w_T H_T \quad (3.2)$$

ICRP는 기준남성(Reference male)과 기준여성(Reference female)에 대해 성별 고유 전산용 모의체(Sex-specific computational phantom)를 새로 정의하였다. 이러한 모의



체 모델들이 외부 피폭에 대한 선량환산계수(Dose conversion coefficient) 및 내부피폭에 대한 선량계수의 계산에 사용되고 있다. 성별 고유의 새로운 전산용 모델은 남성과 여성 장기선량을 따로 계산할 수 있게 하며, 그 결과로부터 평균 장기등가선량(Averaged equivalent organ dose)이 계산된다. 다시 이들은 E 계산에 사용된다. 몇몇 연령대 아동과 태아에 대한 전산용 모의체 들도 새로 규정될 예정으로 있다. 낮은 선량 영역(<100 mSv)에서 확률론적 방사선영향에 대한 문턱없는 선형 선량반응(Linear Non Threshold(LNT) 모델)을 가정함에 따라 E는 더하기 가능한 양(Additive quantity)이 된다. 높은 방사선량에서 조직반응(결정론적 영향)이 발생할 때는, 위험평가를 위해 장기 및 조직에서 흡수선량을 사용해야 한다. 높은 LET 방사선 피폭에 대해서는 결정론적 영향과 관련되는 적합한 RBE(Relative Biological Effectiveness) 값이 사용되어야 한다.

신체 관련 방호량(등가선량과 유효선량)은 이들 양을 직접 측정할 수 없으므로 방사선감시에 직접 적용할 수는 없다. E와 H<sub>T</sub> 평가를 대신하기 위해 실용량(Operational quantity)을 측정한다. 외부피폭에 대해서는 공간과 개인 감시를 위해 실용 선량당량(Dose equivalent) 양이 정의된다. 자유공기 중에서는 공간 감시기로 측정을 수행하는 것이 선호되며, 개인선량계는 신체에 패용한다. 이러한 검출기가 보는 방사선장은 다르므로 다양한 실용량이 정의된다. 공간감시 실용량은 ICRU구체 내 10 mm와 0.07 mm 깊이에서 선량당량을, 개인감시 실용량은 인체에 준하는 물체 위에 있고 연조직 10 mm 또는 0.07 mm로 차폐된 선량계의 선량당량을 권고하고 있다. E와 장기선량은 외부피폭에 대한 선량환산계수에 의해 계산된다. 내부피폭으로부터 선량평가에 대해서는 신체 내 방사성핵종의 거동을 설명하는 생물·역동학모델(Biokinetic model)을 사용하는 직접(즉, 전신 방사능 측정) 또는 간접(즉, 배설물 방사능 측정) 측정을 근거로 방사성핵종 섭취와 그 결과로 발생하는 등가선량과 유효선량을 계산한다.

종사자와 일반인에 대한 방사선방호에서 방사선량은 주로 계획피폭상황(Planned exposure)에서 전망적 선량평가(Prospective dose assessment), 최적화(Optimization) 및 선량한도 준수 확인을 위한 소급적 선량평가(Retrospective dose assessment) 용도로 필요하다. 1년 동안 방사성핵종 섭취는 예탁유효선량(Committed effective dose)을 결정한다. 성인에 대해서는 예탁기간 50년을 고려하고 어린이에 대해서는 70세까지

를 고려한다. 종사자와 공중 구성원의 연간 유효선량은 외부피폭으로부터 1년 동안 받는 유효선량과 같은 기간 방사성핵종 섭취로 인한 예탁유효선량의 합이다.

작업장(Workplace)에서 외부피폭에 의한 유효선량은 일반적으로 균일한 전신피폭을 가정하는 합당한 평가로서 개인선량당량 Hp(10)을 측정하여 책정한다. 방사성핵종 섭취로 인한 예탁유효선량은 방사성물질의 취식(Ingestion)과 흡입(Inhalation)을 고려하여 평가된다. 일반인피폭은 천연 방사선원과 인공 시설로부터 발생할 수 있다. 주로 환경측정과 습관데이터 및 모델링에 의해 선량을 구한다. 환자 의료피폭에 대한 E 사용은 중요한 제약을 받는데 종종 장기나 신체의 일부분이 피폭하고, 환자 연령분포가 일반인 연령분포와 다르기도 하고, 또 고려할 다른 인자들도 있다.

E의 주된 용도 하나는 선량한도 준수를 입증하는 것이다. 이러한 관점에서 E는 낮은 선량에서 확률론적 영향의 발생을 제한하고 규제하는 역할을 하며, 세계적으로 규제목적으로 사용되고 있다. E는 기준인에 대한 기준 값 들을 바탕으로 계산된다. 가중치들은 광범한 실험과 역학 데이터로부터 판단에 의해 선정되고 남녀 모든 연령의 인구에 적용된다. 소급적 선량 특히 개별 경우에 대한 위험평가에는 성별, 연령과 같은 개인 변수 및 장기선량을 고려할 필요가 있다. E는 역학연구(Epidemiological study)에 사용되지 않는다. 결정론적 영향이 발생할 수 있는 사고의 경우 장기와 조직에 대한 흡수선량과 흡수선량을 평가가 필수적이다. 다음으로 문턱선량(Threshold dose) 고려가 중요하고 높은 LET 방사선 피폭에서는 적합한 RBE 값을 선정해야 한다.

집단유효선량(Collective effective dose)은 방사선방호의 최적화에서 특히 직무피폭에 대해 중요하고 유용한 도구로서 유지된다. 과거에 종종 폭넓은 선량과 장기간 및 광범한 지리적 영역에 걸친 방사선피폭의 합으로서 집단유효선량을 계산했었다. 나아가 이에 근거해 방사선 관련 위해(Radiation-related detriments)까지 계산하기도 했다. 높거나 중간 방사선량으로부터 매우 낮은 선량까지 외삽 절차와 선량평가에 관련된 큰 불확실성이 있기 때문에 이러한 계산은 의미가 부족하다. 장기간에 걸친 낮은 개인선량의 합산을 피하기 위해서 제약조건을 설정해야 한다. 피폭자 수, 피폭자 연령 및 성별, 피폭선량 범위, 선량의시간적 분포 및 피폭자의 지리적 분포 등과 같은 특징

이 고려될 수 있다.

방사선방호에서 선량평가를 위해서는 다양한 모델과 변수 값이 필요하다. 모델과 변수 값의 “최선평가치(Best estimates)”를 실험적 조사(Experimental study)와 사람연구(Human study)로부터 도출해 왔다. 어떤 경우에는 이들 값에 큰 불확실성이 있을 수 있음을 알고 있다. 이러한 불확실성 외에 여러 변수에서 생물학적 다양성이 크기 때문에 폭넓은 값으로부터 기준값을 선택해야 한다. 이러한 기준 값과 모델들은 협정적으로 고정되고 따라서 불확도가 없는 점 값이다. 이들을 주기적으로 재평가하고 새로운 과학적 데이터가 가용할 때에는 갱신한다. 이러한 기준 체계는 규제 과정에서 주로 전망적 선량평가를 위해 개발되었다. 선량평가와 특히 선량한도를 넘는 선량 영역에서 위험평가, 그리고 개별적 경우에는 모델과 변수 값의 불확실성이 고려되어야 할 것이다. 그림 3.1에 방사선방호를 위한 선량 양 체계를 나타내었다.

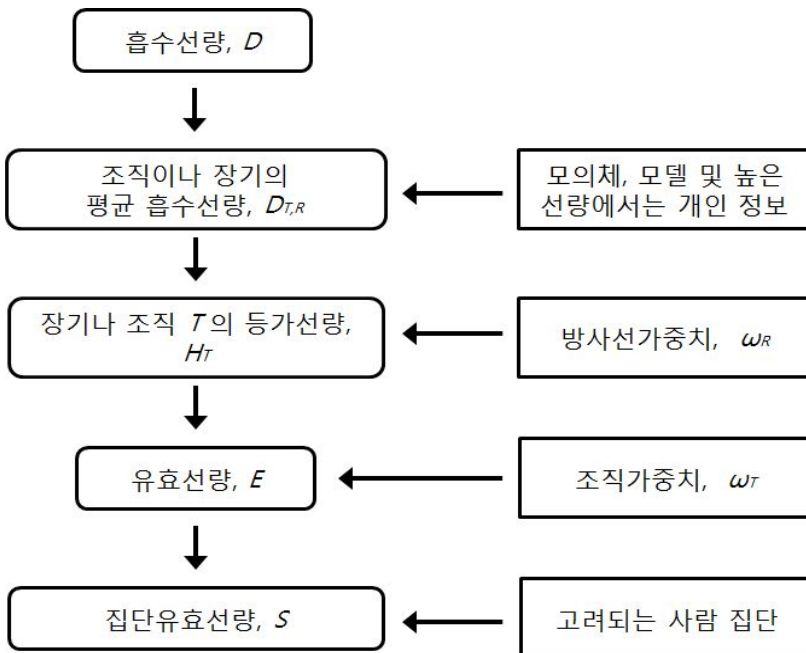


그림 3.1 방사선방호를 위한 선량 양 체계

## 제2절 피폭방사선량 한도와 평가 체계[7,24]

계획피폭상황(Planned exposure situations)에서 직무피폭(Occupational exposure)의 경우, ICRP는 어느 한 해 동안 유효선량(Effective dose)이 50 mSv를 초과하지 않아야 한다는 추가 규정과 함께, 지정된 5년 동안 평균하여 연간 20 mSv (5년 동안 100 mSv)의 유효선량을 선량한도로 하는 권고를 계속 유지한다. 계획피폭상황에서 일반인피폭(Public exposure)의 경우, ICRP는 선량한도를 연간 1 mSv의 유효선량으로 하는 권고를 유지한다. 단, 특수한 상황에서 그보다 높은 유효선량이 한 해에 대해 허용되지만, 이 경우에도 5년 동안 평균값이 연간 1 mSv를 초과하면 안 된다. 유효선량 한도는 외부피폭에 의한 선량과 방사성핵종 섭취에 따른 내부피폭에 의한 예탁유효선량의 합에 적용된다. ICRP 60에서 ICRP는 직무에서 방사성물질 섭취를 5년 기간에 대해 평균할 수 있도록 하여 어느 정도 유연성을 제공한다고 명시하였다. ICRP는 이 입장을 계속 유지한다. 마찬가지로, 일반인에 대한 선량의 평균이 허용되는 특별한 경우에는 일반인의 방사성물질 섭취를 5년 동안 평균하는 것도 허용할 수 있다. 표 3.1에 계획피폭상황에 권고된 선량한도를 나타내었다.

상황을 충분히 이해하는 개인이 자원하여 인명구조 조치(Life-saving actions)에 종사하거나 재앙상황 방지를 시도하는 비상피폭상황(Emergency exposure situations)에는 선량한도가 적용되지 않는다. 이해하는 자원자가 긴급구조 활동을 수행할 때는 정규 선량제한을 완화할 수 있다. 그러나 비상피폭상황의 후기 단계에서 복구와 재건 활동을 수행하는 대응자(Responders)는 직무로 피폭하는 종사자로 간주되어야 하며, 정규 직무피폭 방호 기준에 따라 방호되어야 하고, ICRP가 권고한 직무피폭 선량한도를 초과해서는 안 된다. ICRP는 임신 중이거나 유아 육아를 밝힌 여성 종사자에 대해 특별 방호대책을 권고하고 있으므로, 비상피폭상황에서 초기 대응 수단의 불가피한 불확실성을 고려할 때 그러한 조건에 있는 여성 종사자를 인명구조나 기타 긴급조치를 위한 초동 대응자(First responders)로 쓰지 말 것을 권고한다.

비밀봉 방사성핵종(Unsealed radionuclides)으로 치료를 받은 후 병원에서 퇴원한 환자를 간호하고 위안하는 충분히 이해하는 사람의 경우 정규 선량제한이 완화될 수

있으며, 그런 사람은 일반인에 대한 선량한도 적용 대상이 되지 않는다. 눈의 수정체나 국부 피부는 유효선량 한도만으로는 항상 방호할 수 없기 때문에 유효선량 한도 외에 수정체와 피부에 대한 한도가 ICRP 60에 설정되었다. 그 값은 등가선량으로 설정되었다. 이 한도 역시 변경 없이 그대로 유지한다. 그러나 시각장애와 관련되는 눈의 방사선민감성에 대한 새로운 데이터가 도출될 것으로 예상된다. 눈의 수정체에 대한 새로운 데이터가 가용하면 ICRP는 데이터와 수정체 등가선량한도 관점에서 중요성을 검토할 예정이다. 눈의 위험에 이와 같은 불확실성을 고려할 때 눈이 피폭하는 상황에서 최적화가 특히 중요하다.

조직에 대한 선량한도는 등가선량으로 표현된다. 그 이유는 결정론적 영향에 관련된 RBE (relative Biological Effectiveness) 값이 항상 확률론적 영향에 대한  $w_R$  값보다 작다고 ICRP가 간주하기 때문이다. 그러므로 선량한도가 낮은 LET (Linear Energy Transfer) 방사선에 대한 방호에 못지않은 방호를 높은 LET 방사선에 대해 제공할 것으로 무리 없이 추론할 수 있다. 따라서 ICRP는 결정론적 영향에 대해  $w_R$  을 사용하는 것만으로도 충분히 보수적일 것으로 믿고 있다. 높은 LET 방사선이 주요 인자가 되고 단일조직(피부와 같은)이 현저히 피폭하는 특별한 상황에서는 피폭을 흡수선량으로 표현하고 적절한 RBE를 고려하는 것이 보다 적절할 수 있다. 혼동을 방지하기 위하여 RBE 가중 흡수선량(RBE-weighted absorbed dose)이 Gy 단위로 사용되는 경우에는 이를 분명히 밝힐 필요가 있다.

선량한도 선택을 위한 ICRP의 다속성 접근법(Multi-attribute approach)에는 위험의 다양한 속성에 적용되는 사회적 판단(Societal judgements)을 포함하고 있다. 이러한 판단은 모든 의미에서 반드시 동일할 수는 없으며, 특히 다른 사회에서는 달리 적용될 수도 있다. 이러한 이유 때문에 ICRP는 국가나 지역 상황의 차이를 포괄할 수 있도록 융통성이 충분한 지침을 제공하려고 했다. 그러나 가장 높게 피폭하는 개인에 대한 방호에서 규제당국이 선정하고 방호최적화 과정에 적용되는 선원중심 선량제약치(Source-related dose constraints)를 사용함으로써 그러한 차이는 잘 반영될 것으로 ICRP는 보고 있다.

표 3.1 계획피폭상황에 권고된 선량한도<sup>a</sup>

한도의 유형	직무피폭	일반인피폭
유효선량한도	지정된 5년간 평균하여 연간 20 mSv <sup>e</sup>	연간 1 mSv <sup>f</sup>
연간 등가선량한도		
눈 수정체 <sup>b</sup>	150 mSv	15 mSv
피부 <sup>c, d</sup>	500 mSv	50 mSv
손, 발	500 mSv	-

a 유효선량 한도는 지정 기간 중 외부피폭에 의한 유효선량과 같은 기간 방사성핵종 섭취에 따른 예탁유효선량의 합에 적용함. 예탁유효선량은 성인의 경우 방사성핵종 섭취 후 50년 기간에 대해 계산되며, 아동의 경우에는 70세까지 기간에 대해 계산됨.

b 현재 이 한도는 ICRP 작업그룹에서 재검토 중임.

c 유효선량한도만으로도 피부에 대한 확률론적 영향으로부터 방호를 제공하기에는 충분함.

d 피폭한 면적에 관계없이 1 cm<sup>2</sup> 피부에 대해 평균함.

e 어느 한 해의 유효선량이 50 mSv를 초과하면 안 된다는 추가 규정을 적용함. 임신여성의 직무피폭에 대해서는 추가 제한이 적용됨.

f 5년 평균이 연간 1 mSv를 초과하지 않는 조건에서, 특수한 상황에서는 이보다 높은 유효선량이 어느 한 해에 대해 허용됨.

### 제3절 원전의 피폭방사선량 측정과 선량평가

앞 절에서 기술한 바와 같이, 국내원전에서 피폭방사선량 평가는 1990년 발행된 ICRP 60에 근거한 유효선량(E) 평가 체계를 따르고 있다[3,23]. 이 유효선량은 방사선가중계수( $w_R$ )와 인체의 신체조직가중계수( $w_T$ )를 고려하여 인체의 전신이 받는 피폭방사선량을 말한다. 이러한 유효선량(E)은 이론적인 방호량의 단위로서, 직접적인 측정이 불가능하다. 따라서 국내원전 피폭방사선량 평가 실무에서는 실용량을 적용하여, 인체조직 10 mm 깊이에서 개인선량당량(Personal dose equivalent,  $H_p(10)$ )을 측정하고, 이를 유효선량으로 평가하고 있다[3,4,8]. 그림 3.1에 ICRP에서 적용하고 있는 방사선량 측정과 양 체계를 나타내었고, 그림 3.2에는 선원에서 사람까지 이어지는 피폭방사선량 평가 체계를 나타내었다[24].

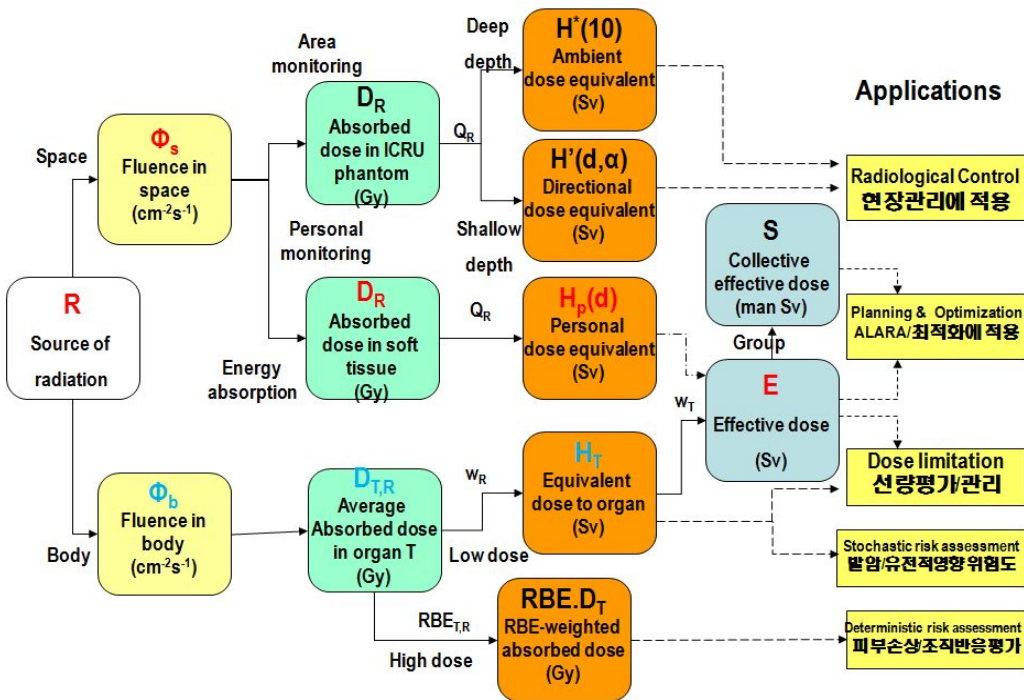


그림 3.2 피폭방사선량 평가에 관한 체계도

앞에서 언급한 바와 같이, 국내원전에서 방사선작업종사자의 피폭방사선량의 측정과 평가에는 열형광선량계(Thermoluminescent Dosimeter: TLD)를 이용하고 있다. 이는 국내 원자력안전법에서 규정하고 있는 주선량계(Primary dosimeter)와 보조선량계 패용 체계에 따른 것이다. 원전종사자는 방사선관리구역에 출입할 때 TLD를 가슴 부위에 패용하며, 월 단위로 피폭방사선량을 평가하고 있다. 원전 방사선관리구역에 출입하는 종사자는 TLD와 함께 전자식 개인선량계인 EPD(Electronic Personal Dosimeter) (또는 원전에서는 간단히 ADR(Auto Dosimetric Reader) 이라 칭함)를 동시에 패용하여 방사선작업과정 중에 자신이 받은 선량을 점검하도록 규정하고 있다[10,23]. 한편 방사성물질과 접촉을 하는 손이나 손가락이 고평폭을 받을 수 있음을 고려하여 말단선량계(Extremity dosimeter)를 패용하여 손이 받는 등가선량(Equivalent dose)을 평가하고 있다[17-19]. 이외에 운전 중인 원전의 격납건물을 출입함에 따라 중성자 피폭이 예상될 때는 추가로 중성자 측정기(Neutron survey meter)나 중성자 측정용 전자식 개인선량계를 패용하고 있다.

국내원전에서 피폭방사선량은 크게 개인에 대한 선량관리를 위한 유효선량의 측정과 평가, 방사선작업과 ALARA 선량관리를 위한 집단유효선량(Collective effective dose)의 관리측면으로 나누어진다[1]. 그렇지만 모든 피폭방사선량의 감시는 개인의 유효선량 측정과 평가로부터 출발하고 있다. 앞에서 기술한 바와 같이, 유효선량의 측정과 평가에는 개인선량계로서 TLD가 이용되고 있다. 이는 원자력안전법령에서 규정한 TLD를 법적인 주선량계로 이용하고 있으며, 보조적으로 ADR(또는 EPD)을 이용하여 피폭방사선량을 관리하고 있음에 근거하고 있다[10,21,25].

한편, 국내원전에서 종사자의 피폭방사선량을 평가하기 위해서 한국원자력안전기술원(KINS)이 주관하는 개인 피폭방사선량평가에 관한 성능시험(Performance test)에 합격해야만 피폭방사선량을 평가할 수 있도록 규정하고 있다[23,26]. 즉, 국내에서는 규제기관으로부터 서류검사, 시설 및 인력에 대한 검사에 합격하고, 마지막으로 성능시험(Performance test) 검사에 합격하여야, 방사선작업종사자의 피폭방사선량을 평가하도록 규정하고 있다[23,26].



이 성능시험은 자체 또는 전문 판독기관이 사용 중인 개인선량계(TLD)를 규제기관에 제출하면 규제기관은 여기에 방사선량을 조사하여 판독기관에 보낸다. 판독기관에서는 이 TLD를 판독하고 미지선량(Unknown dose)을 평가하여 그 결과를 규제기관에 제출하게 된다. 규제기관에서는 TLD 조사선량과 판독기관이 제출한 선량의 차이를 비교하고 정해진 성능지표를 만족하는 지를 확인하고 있다. 한편, 성능지표의 허용준위로서 사고선량 범주(Accident dose category)에 대해서는 조사선량에 대한 판독선량의 편중(Bias)과 표준편차의 합이 30 %, 작업선량 범주(Protection dose category)에 대해서는 50 % 이내를 유지해야만 성능시험에 대한 적합성을 인정하고 있다[23,26]. 표 3.2에 국내에서 시행중인 방사선장의 종류와 성능검사 범주를 나타내었다.

표 3.2 방사선 종류별 성능검사 범주 및 시험방사선 종류

성능검사 범주	방사선 종류			
	감마	X-선	베타	중성자
I. 고선량, 저에너지 광자 M150		○		
II. 고선량, 고에너지 광자 $^{137}\text{Cs}$ 의 $\gamma$ 선	○			○
III. 저에너지 광자 M30, M60, M100, M150, H150		○	○	○
IV. 고에너지 광자 $^{137}\text{Cs}$ 의 $\gamma$ 선	○			○
V. 베타, $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ , $^{204}\text{Tl}$			○	
VI. 광자 혼합 방사선장 III 및 IV 항의 혼합	○	○		○
VII. 베타-광자 혼합 방사선장 IV 및 V 항의 혼합	○	○	○	
VIII. 중성자 - 광자 혼합 방사선장				○

## 제4장 원전 방사선피폭 특성

### 제1절 원전의 방사선피폭 핵종

원전에서는 다양한 핵종이 생성되고, 그중 일부는 작업공간이나 환경으로 방출되고 있다. 이에 따라 정상운전과 계획예방정비기간 중에 수행되는 운전(Operation)이나 보수(Maintenance) 과정에서 작업자는 방사선피폭을 받게 된다. 이러한 피폭은 일차계통의 펌프나 증기발생기에 부착되어 있는 방사성핵종으로부터 발생된 방사선에 의한 외부피폭이나, 작업공간의 공기 중에 부유하는 방사성물질의 체내 섭취에 의한 내부피폭 등으로 나뉘어진다. 한편 계통에서 누설된 방사성핵종은 방사성폐기물처리계통 등을 거쳐 대부분 제거되나 일부는 환경으로 배출되고 있다. 이에 따라 원전 주변에 거주하는 주민은 이러한 방사성유출물에 의한 외부 방사선피폭이나 방사성물질이 식물이나 동물로 전이되어 오염된 음식을 섭취하는 경우 방사선피폭이 발생할 수 있다. 그림 4.1은 중수로원전에서 발생하는 대표적인 방사성핵종을 보여주고 있다[25].

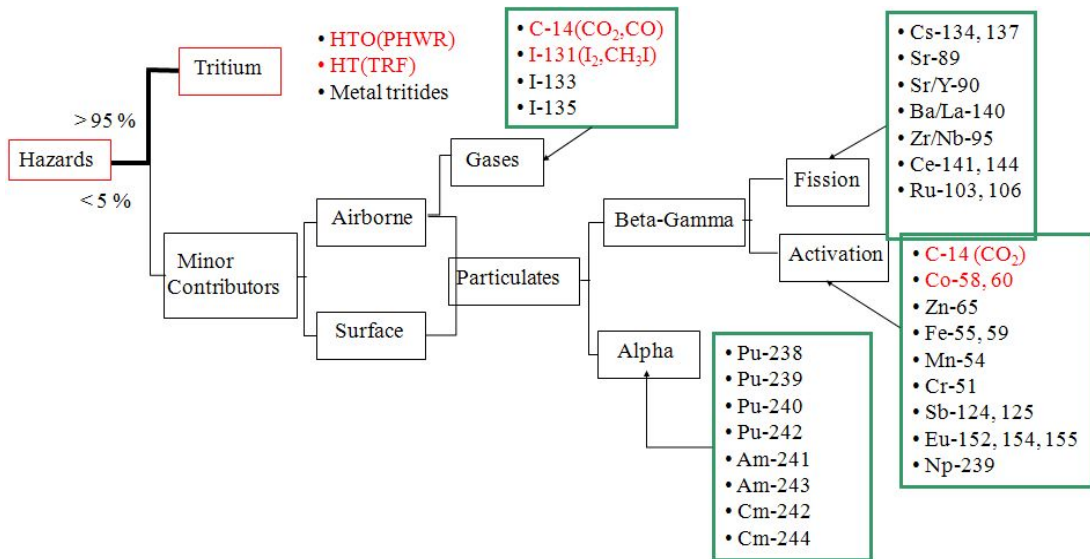


그림 4.1 Dominant contributors to radiation exposure in a pressurized heavy water reactor and its risk

일반적으로 원전종사자의 경우 원자로 계통의 운전이나 기기나 장비의 보수 작업과 정에서 방사선피폭을 받게 된다. 이 경우 대부분 기기나 장비에 부착되어 있는 방사성 물질에서 발생하는 방사선에 의한 외부피폭이 대부분이나, 극히 일부는 공기 중으로 부유된 방사성핵종의 체내섭취에 따른 내부피폭이 발생하기도 한다. 원전종사자의 피폭방사선량 평가는 다양한 방사성핵종으로부터 여러 장소에서 발생하는 넓은 범위의 에너지를 가진 비정렬 방사선(Non-aligned radiation)에 의한 피폭방사선량을 평가하여야하기 때문에 선량계나 계측장비를 이용한 개인중심으로 평가하고 있다[3,7,10].

원전의 증기발생기 수실(Steam generator water chamber) 내부는 대표적인 고준위 비균질 방사선장이 발생하는 지역이다[10]. 이 지역에서 작업하는 경우 다양한 부식생성물(Corrosion products)에 의한 고에너지 감마선이 주요 피폭원이다. 특히 증기발생기 수실은 부식생성물에서 발생하는 감마선과 외벽에 의해 산란된 저에너지 산란 광자 등이 포함된 복잡한 방사선장으로 구성된다. 이러한 부식생성물 중 대표적인 핵종들은  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  등이 있는데, 주요 피폭원인  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ 은 증기발생기 수실 내부 방사선장의 약 95 % 정도를 구성하는 것으로 알려져 있다[10,13,27-31]. 표 4.1은 부식생성물 중에 비교적 장반감기를 갖는 핵종들의 방사선학적 특성을 보여주고 있다[13]. 따라서 증기발생기 수실 내부의 방사선량률은 이러한 부식생성물이 침적된 정도에 비례해 나타난다.

표 4.1 원전 주요 부식생성물과 특성

Radionuclides.	Half-life	Energy (keV)	Yield
$^{60}\text{Co}$	5.27y	1173.24	99.90
		1332.50	99.98
$^{58}\text{Co}$	70.9d	511	29.80
		810.77	99.45
$^{54}\text{Mn}$	312.2d	834.84	99.98
$^{51}\text{Cr}$	2707d	320.1	9.92
$^{59}\text{Fe}$	44.5d	1099.24	56.5
		1291.59	43.2
$^{95}\text{Zr}$	64.0d	724.20	44.3
		756.73	54.5

## 제2절 원전의 방사선장 특성

국내원전을 대상으로 계통의 방사선장 특성을 실제 측정하여 방사성핵종과 에너지를 분석한 결과는 다수 이루어졌다. 대표적으로 운전 중인 가압경수로 원전을 대상으로 휴대용 고성능반도체 다중파고분석기(Portable HPGe spectrometer)를 이용하여 감마 방사선장을 측정하였다[25,28]. 그 결과 감마선의 평균에너지 값의 분포는 가동정지 중인 격납건물(Containment building)내에서는 440~780 keV, 가동 중인 보조건물(Auxiliary building)내에서는 280~760 keV로 나타났다. 이러한 국내원전의 감마선 에너지 분포 결과를 표 4.2에 요약하였다[25,28].

표 4.2 국내 원전의 방사선장 측정결과

방사선 종류	측정장비	측정지역	원전의 상태 (운전 또는 정지)	측정 지점의 수	평균에너지 (keV) 또는 베타 주요핵종
Gamma	Portable HPGe Detector	격납건물	Shutdown	8	436.8~783.6
		보조건물	Normal operation	7	346.7~715.8
		보조건물	Normal operation	7	279.9~803.7
Neutron	BMSS	격납건물	Normal operation	7	17.3~206.4
Beta	Si semi-conductor detector	격납건물	Shutdown	6	<sup>60</sup> Co
		보조건물	Shutdown	8	<sup>60</sup> Co

한편 가동 중인 원전의 격납건물 내에서 Operation deck을 중심으로 5개 지점에 대해 BMSS(Bonner Multiple Spectrometry System)를 이용하여 중성자 선장을 측정하였다. 그 결과 평균에너지 분포는 20~210 keV로 나타났다[25,28]. 한편, 베타 방사성핵종의 Hot particle 등에 의한 방사선작업종사자의 체외 국부 오염 가능성을 평가하고자 다양한 조사를 수행하였다. 가동정지 상태의 원전의 격납건물 내부와 보조건물 내부의 다수 지점에 대해 스메어 방법(Smear method)에 의한 시료를 채집하였다. 이들 시료에 대해 표면장벽형 Si 반도체 검출기를 이용하여 핵종과 에너지 스펙트럼을

분석한 결과 부식생성물인  $^{60}\text{Co}$ 에 의한 베타에너지가 지배적인 것으로 나타났다.

원전의 대표적인 고평폭 작업인 증기발생기 작업의 경우  $^{58}\text{Co}$ 과  $^{60}\text{Co}$ 이 방사선량률에 95 % 이상 기여하는 것으로 나타났다[10]. 특히 방사선량의 구배(Dose gradients)는 수실 위에 있는 U-tubes에서 위에서 아래로 형성되며, 방사선량률은 최소 수 mSv/hr에서 수십 mSv/hr 이상으로 높게 나타났다[10,12]. 그림 4.2에 증기발생기 수실의 모양, 크기 및 작업 개요를 나타내었다[10,12]. 이 그림에서 보는 바와 같이 증기발생기 수실에서 방사선원은 위쪽에 있는 U-tube에서 발생하며, 방사선장은 위에서 아래로 형성되는 것으로 나타났다. 이러한 사항은 제5장에서 보다 자세히 기술한다.

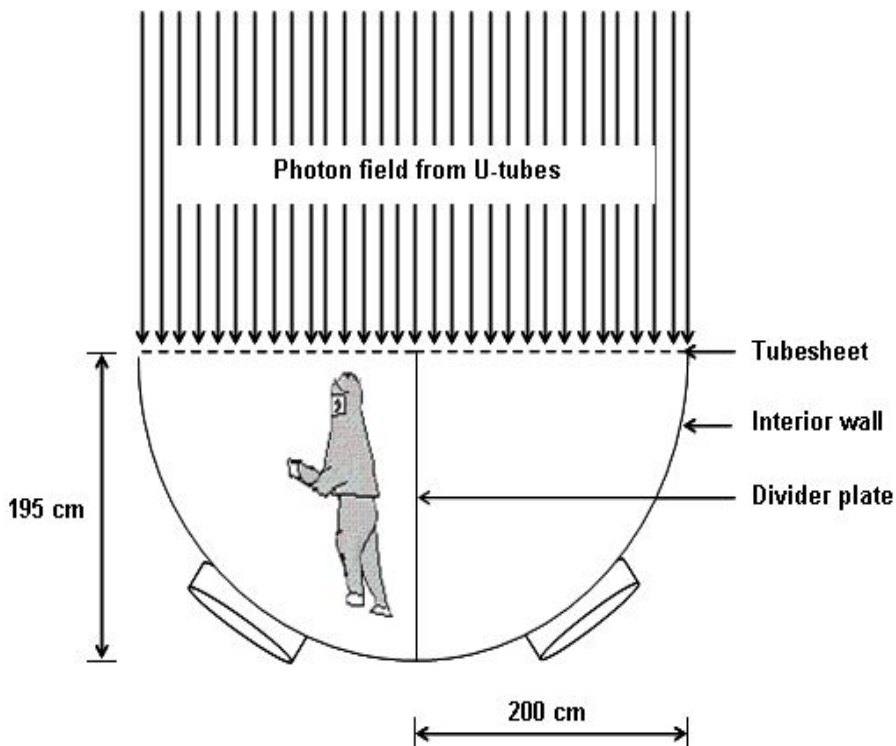


그림 4.2 Maintenance on the steam generator in a nuclear power plant

## 제5장 고평폭 방사선작업의 유효선량 평가

### 제1절 원전의 복수선량계 적용현황

국내 원전에서 복수선량계는 방사선량률이 상하로 형성되는 증기발생기 수실 관련 작업 등을 위주로 머리와 가슴에 각각 1개씩 총 2개를 패용하였다[10]. 국내 원전의 이런 TLD 패용 방식은 아래 그림 5.1에서 상세히 보는 바와 같이 증기발생기 수실 작업 등과 같이 대부분 고방사선 작업이 방사선량률 구배가 상하로 형성되는 점을 고려한 것으로 판단되었다[13]. 따라서 TLD를 주요 방사선원이 발생하는 지점으로 변경하여 패용하였기에 크게 문제되는 상황은 아니라고 여겨진다. 그런데 방사선원이 등 뒤에 또는 가슴 정면에 위치하거나 또는 발목 부위 등에 위치할 때는 종사자가 받는 피폭 방사선량을 저평가할 수도 있다고 판단되었다[10].

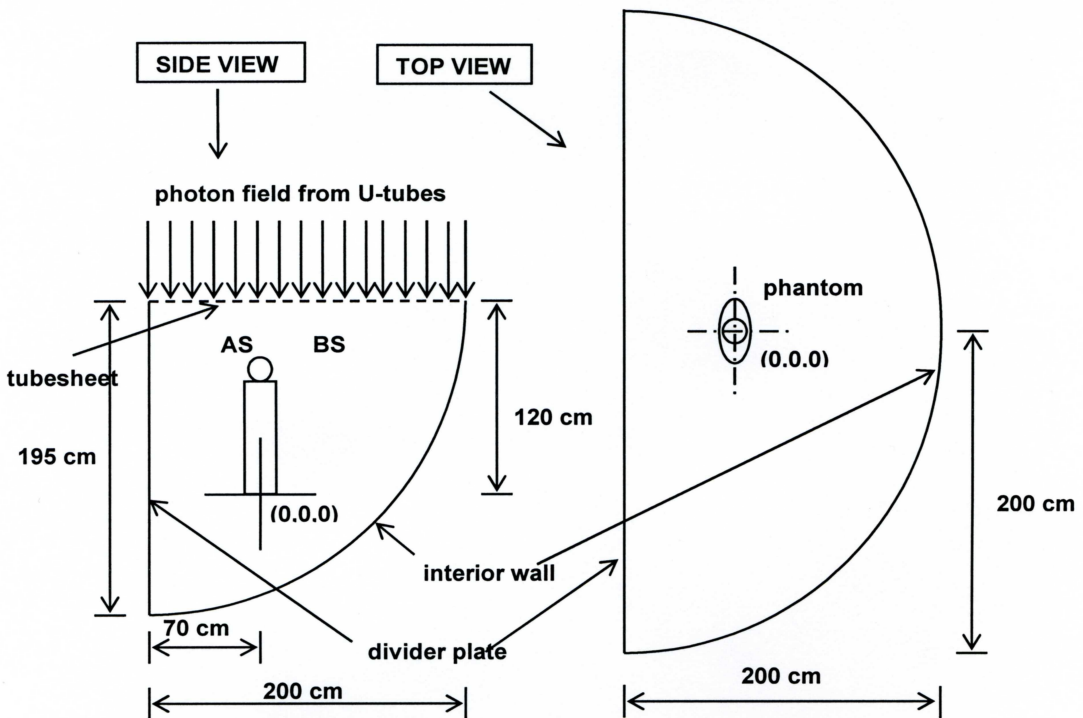


그림 5.1 Source geometry of steam generator

한편 복수선량계의 지급은 한번에 3 mSv 이상의 피폭방사선량을 받을 것으로 예상되는 방사선작업이나 신체 부위별로 피폭 방사선량률이 50 % 이상 차이가 나는 1 mSv/hr 이상인 경우 2개의 복수선량계를 지급하였다[11,32,33]. 이러한 지급조건은 미국 또는 세계원자력발전자협회(INPO or WANO) 방사선방호지침에서 규정하고 있는 복수선량계 지급조건을 원전의 방사선관리 절차에 적용한 것으로 판단되었다[15,16]. 그런데 이 지급조건이 국내 원전별로 약간씩 상이하였는데, 이는 INPO 지침을 근간으로 방사선관리 절차에 반영하는 과정에서 발전소별로 주관적으로 해석하여 적용한 결과로 판단되었다[10].

한편 복수선량계를 이용한 종사자의 피폭방사선량 평가는, 머리와 가슴에 패용한 개인선량계(TLD) 판독값 중에서 최대값(Maximum value)을 유효선량으로, 보수적으로 평가하여 왔다[11,32,33]. 이러한 보수적 평가방법은 국내 원전을 포함하여 외국 원전에서도 대부분 채택하고 있는 방법으로, 특별히 방사선관리 측면에서 볼 때 특별히 문제되는 사안은 아니라고 판단되었다[10]. 그런데 2003년부터 ICRP 60의 적용으로 방사선작업종사자의 선량한도가 연평균 20 mSv으로 낮아짐에 따라, 이러한 보수적 평가는 방사선관리 측면에서 피폭방사선량의 여유가 많이 줄어들었다[23]. 또한 과거의 관례에 따른 보수적 평가는 원전종사자에 대한 피폭방사선량 평가의 정확성과 신뢰성을 떨어뜨릴 소지가 있다고 판단되었다.

미국 원전에서는 복수선량계를 지급하고 이용하는 기본적인 기준은 미국의 INPO에서 발행된 INPO 91-014 방사선방호지침을 따르고 있는 것으로 확인되었다[6]. 여기에 따르면 방사선량률이 잘 알려진 작업구역에서 특정 신체부위의 선량이 가슴부위의 선량에 비해 50 %를 초과할 가능성이 있고, 1 mSv/hr 이상의 고선량을 작업구역에서는 TLD 패용위치를 가장 높은 선량을 받을 것으로 예상되는 부위로 변경하도록 권고하고 있다. 또한 방사선량률이 특정 신체부위 선량률의 50 %를 초과하면서, 방사선량률이 1 mSv/hr 이상으로 변화할 가능성이 있거나 또는 선량률을 모르면서 단일작업으로 3 mSv 이상의 피폭을 받을 것으로 예상될 때는 추가적인 복수선량계를 지급하도록 규정하고 있었다[15,16].

미국의 Nine Mile Point 원전에서는 방사선량률의 조건에 따라 선량계의 패용위치를 바꾸거나 복수선량계를 지급하는 것으로 확인되었다[10]. 선량계 패용위치의 변경은 가슴부위의 선량률보다 특정부위의 선량률이 1.5배가 차이가 나면서 1.25 mSv 이상의 피폭 방사선량이 예상되고 예상선량률이 1 mSv/hr 이상일 때 행하는 것으로 확인되었다. 이에 비해 복수선량계는 가슴부위의 선량률보다 특정부위의 선량률이 1.5배 이상 차이가 나면서, 1.25 mSv 이상의 피폭 방사선량을 받을 것으로 예상될 때 또는 예상 선량률이 1 mSv/hr 이상으로 방사선감독자의 지시가 있을 때 패용하는 것으로 확인되었다. 이 경우 피폭 방사선량 평가는 선량계 판독 값 중에서 최대치를 적용하여 전신선량으로 평가하고 있는 것으로 확인되었다. Pilgrim 원전에서도 복수선량계를 패용하였을 때 피폭 방사선량 평가에는 공통적으로 별도의 복수선량계 알고리즘을 적용하지 않고 복수선량계 판독 값 중에서 최대값을 적용하여 전신선량으로 평가하고 있는 것으로 확인되었다[10]. 또한 San Onofre 원전은 방사선량률 조건에 따라 선량계의 패용 위치를 바꾸거나 복수선량계를 지급하여 패용하는 것으로 확인되었다[10]. 한편 Diablo Canyon 원전에서는 전신선량률(Whole body dose rate)이 1 mSv/hr 이상이면서 특정부위 선량이 가슴부위 선량보다 50 % 이상 차이가 나고 전신선량이 0.5 mSv를 초과할 것으로 예상될 때는 가장 높은 선량을 받을 것으로 예상되는 부위를 알 때는 선량계의 위치를 변경하여 패용하고 있었다. 만약 가장 높은 선량을 받을 것으로 예상되는 신체 부위를 모를 때는 복수선량계를 발급하도록 규정하고 있었다.

캐나다의 Pickering 원전은 복수선량계 판독값을 이용한 피폭 방사선량 평가 알고리즘의 적용 등에 대한 명확한 지침이 확립되어 있는 것으로 확인되었다[34-36]. Pickering 원전의 피폭방사선량 평가절차에 따르면 복수선량계 판독값에 대해 국제방사선방호위원회(ICRP)의 조직가중치의 부여와 이를 합산하여 유효선량을 평가하도록 하는 알고리즘을 채택하고 있었다. 특히 ICRP 권고의 법제화에 따라 ICRP 26과 ICRP 60의 조직가중치를 순차적으로 복수선량계 알고리즘에 적용하였다. 이러한 캐나다 원전의 복수선량계 패용은 ACRP (Advisory Committee on Radiological Protection of Canada)의 권고사항 ACRP-17와 NCRP-122, ANSI HPS N13.41-1997 등에 근거하고 있음을 확인하였다[36-38].



OPG(Ontario Power Generation)에서 복수선량계 적용지침은 국제방사선방호위원회의 권고지침을 충실히 따르고 있다고 확인되었다[34,35]. 즉, ICRP 60이 발간되기 이전의 복수선량계 적용지침은 ICRP 26의 조직가중치 개념을 적용하고 있었다. 즉 머리 부분이 받은 선량에 40 % 가중치를 부여하고, 가슴부분이 받은 선량에 60 % 가중치를 부여하여 평가하였다. 이를 (5.1) 식에 나타내었다. 여기서 D는 등가선량이다.

$$H_E = 0.4D_H + 0.6D_C \quad (5.1)$$

한편 캐나다 원전에서는 ICRP 60의 법제화에 따라 ICRP 60의 조직가중치를 적용하여 복수선량계 알고리즘이 변경되었고, 이를 (5.2) 식으로 나타내었다. 여기서 E는 유효선량이다. 이 경우 0.11과 0.89는 ICRP 60의 조직가중계수를 고려한 가슴부위와 머리부위의 선량 가중치이다[34,35].

$$E = 0.11H_p(10)_{head} + 0.89H_p(10)_{torso} \quad (5.2)$$

## 제2절 복수선량계 알고리즘

미국 국립표준기술협회(ANSI)에 의해 1997년 작성된 복수선량계 알고리즘에 관한 지침으로 ANSI HPS N13.41에서 상세히 제시되어 있다[38]. 이 지침에서는 신체의 가슴과 최대의 방사선량을 받을 곳으로 예상되는 곳에 다수의 선량계를 착용하도록 규정하고 있다. 이 경우 복수선량계 알고리즘은 방사선가중계수를 적용하여 계산된 신체 각 부분에 할당되는 인자(Compartment factors)로 정하고 있다. 작업종사자의 유효선량은 지급한 다수의 선량계 판독값에 신체 부위 할당 인자를 곱한 후 합산하여 평가하도록 규정하고 있다. 따라서 작업종사자의 유효선량은 (5.3)식으로부터 얻을 수 있다.

$$H_E = \sum_c W_c H_{p,c} (10) \quad (5.3)$$

위 식에서  $H_{p,c}(10)$ 은 각 신체 부위의 선량계 판독 값으로, 측정하지 않은 신체 부위에 대해서는 인접한 신체 부위에서 측정된 가장 높은 판독값을 의미한다. 이 지침에 따른 경우 유효선량은 머리 부위는 10 %, 가슴부위는 90 %의 가중치를 부여하고 있는 것으로 조사되었다.

미국의 ANSI 알고리즘과 캐나다 OPG에서 채택하고 있는 알고리즘은 입사하는 방사선원이 상하로 형성됨을 전제로 하고 있다. 즉, 증기발생기 수실 내에서 이루어지는 작업의 경우, 입사 방사선원이 머리 위쪽에 위치하므로 머리와 가슴을 기준으로 ICRP에서 권고하고 있는 조직가중계수를 근간으로 복수선량계의 선량계 판독값에 대한 가중 인자를 제시하고 있다. 따라서 이들 두 알고리즘은 내용에 있어 머리 부분에 약 10 % 가중치, 가슴이하 부분에 약 90 %의 가중치를 부여하고 있다. 이러한 복수선량계에 관한 두 알고리즘이 선택한 용어나 문구만 다를 뿐 실상은 같은 내용의 알고리즘으로 보아도 무방하다고 판단되었다.

미국 방사선방호위원회(NCRP) NCRP-122에서는 작업종사자에게 지급한 복수선량계 판독값에 대해 가중치를 부여하여 유효선량을 평가하도록 하는 2가지의 복수선량계 알고리즘을 제공하고 있다[37]. 이 두 가지 방법은 (5.4)식, (5.5)식과 같다.

$$H_E(\text{estimate}) = 0.70H_p(10)_{\text{front}} + 0.30H_p(10)_{\text{back}} \quad (5.4)$$

$$H_E(\text{estimate}) = 0.55H_p(10)_{\text{front}} + 0.50H_p(10)_{\text{back}} \quad (5.5)$$

(5.4)식은 가슴(정면) 부위 선량에 70 %의 가중치를 부여하고 등(뒷면) 부위에 30 % 가중치를 부여하여 유효선량을 계산하는 방식이다. (5.5)식은 가슴(정면) 부위 선량에 55 %의 가중치를 부여하고 등(뒷면) 부위 선량에 50 %의 가중치를 부여하여 유효선량을 계산하는 NCRP(55/50) 산출방법을 나타낸 것이다.

또한 미국 원자력규제위원회(USNRC)는 외부방사선 피폭으로부터 두 개의 복수선량계를 사용하였을 경우에 대한 규제입장을 제시한 바 있다[39]. 이 보고서에서는 복수선량계의 판독값에 적절한 가중치를 부여하여 유효선량을 평가하도록 하는 규제지침을 내놓았다. 이 방법에 대한 논리는 미국전력연구소(EPRI)의 연구결과에 근거하고 있다. 이러한 복수선량계 알고리즘 평균방법(Mean method)과 가중방법(Weighted method) 중에서 가중방법에 대해서만 NRC가 인정하고 있다. 즉 외부선원에 의한 유효선량당량( $EDE_{ex}$ )을 (5.6)식과 같이 평가하는 알고리즘을 채택하고 있다[40].

$$EDE_{ex} = \frac{1}{2} (Hi + Mean) = \frac{3}{4} Hi + \frac{1}{4} Lo \quad (5.6)$$

여기에서 Hi는 신체 앞면에 패용한 선량계 판독값( $R_{\text{front}}$ ) 또는 신체 뒷면에 패용한 선량계 판독값( $R_{\text{back}}$ ) 중에서 높은 판독 값을 말한다. 마찬가지로 Lo는 신체 앞면에 패용한 선량계 판독값( $R_{\text{front}}$ ) 또는 신체 뒷면에 패용한 선량계 판독값( $R_{\text{back}}$ ) 중에서 낮은 판독 값을 말한다. 이 알고리즘은 1995년에 Xu 등이 발표한 (5.7)식과 유사하다[40].

$$H_E(\text{estimate}) = \frac{[H_p(10)_{\text{max.of front or back}} + H_p(10)_{\text{avg.of front or back}}]}{2} \quad (5.7)$$

한편 미국의 Texas A&M University를 중심으로 불균일 방사선장하에서 복수선량계를 사용하는 경우 이들 선량계 판독값에 적절한 가중치를 부여하여 유효선량을 평가하도록 하는 논문을 수편 발표한 바 있다. 대표적으로 1991년 Lakshmanan 등이 개발한 산출방법은 두 개의 개인선량계로부터 구한  $H_p(10)$ 값의 합을 1.5로 나누는 방법이며 (5.8)식과 같다[41].

$$H_E(\text{estimate}) = \frac{[H_p(10)_{\text{front}} + H_p(10)_{\text{back}}]}{1.5} \quad (5.8)$$

또한 미국의 Texas A&M University의 Kim은 1998년 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 또 다른 복수선량계 알고리즘을 제시하였다[42,43]. 이 산출방법은 (5.9)식과 같다.

$$H_E(\text{estimate}) = h(H_E)[0.58H_p(10)_{\text{front}} + 0.42H_p(10)_{\text{back}}] \quad (5.9)$$

$$\text{where } h(H_E) = \frac{0.9H_E(AP)}{0.58H_{\text{front}}(AP) + 0.42H_{\text{back}}(AP)}$$

Kim은 수직각과 수평각을 각각 15 °로 분할하여 조사하였는데, 에너지는 0.02 MeV 부터 0.02 MeV 간격으로 1 MeV까지 광자에 대해 계산하였다. 또한 사용한 선량계에 대해 ICRU slab을 이용하여 산출하였는데,  $h(H_E)$ 는 0.08, 0.3, 1, 2 MeV의 광자에 대해 1.09, 1.09, 1.04, 1.00으로 계산되었다. 따라서  $h(H_E)$ 는 광자에너지가 매우 낮은 영역(<80 keV)을 제외한 대부분 영역에서 1.05를 사용할 수 있다고 밝히고 있다.

이외 일본의 경우 일본보건물리학회지의 저널에 실린 논문을 통해 복수선량계 사용 지침을 확인할 수 있었다[44]. 이 논문에서는 복수선량계 알고리즘을 적용할 경우 불균일 피폭에 의한 영향이 이전에 비해 줄어들 수 있다고 기술하고 있다. 복수선량계 알고리즘 내용은 (5.10)식과 같다.

$$E = 0.08H_a + 0.44H_b + 0.45H_c + 0.03H_m \quad (5.10)$$

여기에서  $E$ 는 유효선량,  $H_a$ 는 머리와 목 부분으로 구성된 두부에서 1 cm 선량당량,  $H_b$ 는 흉부 및 상완부에서 1 cm 선량당량,  $H_c$ 는 복부 부위에서 1 cm 선량당량,  $H_m$ 은 상기 3가지 양 중에서 최대치를 나타내는 선량당량이다. 이 알고리즘은 증기발생기 수 실과 같이 방사선원이 위쪽에 위치할 경우 머리부위 약 11 %, 가슴부위 약 89 %의 가중치로 표시된다. 이는 앞서 언급한 OPG와 ANSI 알고리즘과 유사하다고 판단되었다. 이러한 알고리즘 중에서 중요 현황을 표 5.1에 요약하였다[10,12].

표 5.1 Two-dosimeter Algorithms

Developer	Algorithm
Ontario Power Generation (OPG)	$H_E (estimate) = 0.11H_P(10)_{head} + 0.89H_P(10)_{torso}$
American National Standard Institute (ANSI)	$H_E (estimate) = \sum_C W_C H_{P,C} (10)$
National Council Radiation Protection and Measurements (NCRP)	$H_E (estimate) = 0.70 H_P (10)_{front} + 0.30 H (10)_{back}$ $H_E (estimate) = 0.55 H_P (10)_{front} + 0.50 H (10)_{back}$
Electric Power Research Institute (EPRI) & Nuclear Regulatory Commission (NRC)	$EDE_{ex} = \frac{1}{2} (Hi + Mean) = \frac{3}{4} Hi + \frac{1}{4} Lo$
Lakshmanan	$H_E (estimate) = \frac{[H_P (10)_{front} + H_P (10)_{back}]}{1.5}$
Kim(Texas A&M University)	$H_E (estimate) = h(H_E)[0.58 H_P (10)_{front} + 0.42 H_P (10)_{back}]$ where, $h(H_E) = \frac{0.9 H_E (AP)}{0.58 H_{front} (AP) + 0.42 H_{back} (AP)}$

### 제3절 복수선량계 알고리즘 적용시험과 선정결과

복수선량계 알고리즘에 대한 문헌조사를 통해 적용성을 판단하기 위한 현장시험에서 고려할 복수선량계 알고리즘을 일차적으로 선정하였다. 앞에서 기술한 바와 같이, 현장시험에서 모두 6개의 알고리즘을 고려하였다. 우선적으로 방사선원이 머리 위쪽에 즉, 방사선장이 수직방향으로 위치하는 경우를 고려한 캐나다 OPG 알고리즘과 미국 ANSI 알고리즘을 대상으로 하였다. 이들 두 알고리즘은 가중치를 고려할 때 동일하다 할 수 있다. 또한 방사선원이 수평방향으로 위치하는 경우를 고려한 NCRP 알고리즘, 미국 EPRI가 제시하고 미국 NRC에서 승인한 알고리즘, 미국 Texas A&M 대학에서 제시된 Laksmanan과 Kim 알고리즘 등의 알고리즘을 고려하였다[10].

복수선량계 적용성 시험은 한빛과 한울원전의 계획예방정비기간 중에 불균일 방사선장이 형성되는 증기발생기 수실내 방사선작업 등에 대해 실시되었다. 먼저 작업종사자에게 복수선량계 알고리즘 적용성 시험을 설명하고 이해를 구하였다. 각각 3개의 열형 광선량계(TLD)와 보조선량계(ADR)를 지급하였고, 이를 머리, 가슴, 등에 TLD와 ADR을 동시에 패용하였다. 이렇게 3개 부위에 TLD를 동시에 패용한 사유는 캐나다와 ANSI 복수선량계 알고리즘은 머리와 가슴에 패용한 TLD 판독값을 필요로 하며, NCRP, EPRI(NRC), Laksmanan과 Kim 복수선량계 알고리즘 등은 가슴과 등의 부위에 패용한 TLD 판독값이 필요하기 때문이었다[10].

방사선작업 완료 후에는 TLD와 ADR을 동시에 수거하여 판독하였고, 3개의 TLD 판독값 중에서 알고리즘 특성에 따라 2개의 TLD 판독값을 기준으로 유효선량을 계산하였다. TLD 판독값을 기준으로 계산된 유효선량의 적절성을 검토하였고, 최적 알고리즘을 찾고자 다양한 분석을 시도하였다. 한빛원전에서 복수선량계 적용성 시험의 결과는 표 5.2와 5.3에 나타내었다. 한편 한울원전에서 적용성을 판단하기 위한 현장시험의 결과는 한빛원전 시험결과와 유사하여 생략하였다. 한편 ADR 값은 TLD 판독값을 보증하는 수단으로 활용하였다. 이 경우 모든 TLD 판독값과 ADR 판독값이 일정한 비율로 유사하게 나타나 TLD 판독값이 적절함을 확인할 수 있었다[10]. 또한 랜덤 추출과정을 통해 TLD 판독값과 ADR 판독값의 비교를 통한 피폭선량의 확인과정과 고평폭 중

사자의 선량률과 작업시간을 고려한 피폭방사선량의 검증과정을 거쳤다[10].

복수선량계 알고리즘 적용성 시험 결과를 각 알고리즘에서 요구되는 TLD 판독값을 기준으로 유효선량을 계산해 본 결과 Laksmanan 알고리즘을 제외하고는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 모든 알고리즘이 두 개 선량계 판독값을 2로 나누어준데 비해, Lakshmanan 알고리즘은 1.5로 나누어 준 결과에 기인하였다. 이에 따라 Laksmanan 알고리즘은 과대평가로 인해 후보 알고리즘에서 제외하였다. 이를 표 5.4와 5.5, 그림 5.2와 5.3에 나타내었다. 한편, TLD 패용 위치가 가슴과 머리, 가슴과 등으로 바뀔때 따라 유효선량은 차이가 없다고 평가되었다. 또한 미국 NRC와 NCRP 등 주요 기관들에서 제시된 복수선량계 알고리즘은 머리와 등 위치에 복수선량계를 패용하도록 권고하고 있고, 여러 연구자의 몬테카를로 시뮬레이션 결과에서도 가슴과 등에 패용하는 것이 가슴과 머리에 패용하는 것에 비해 저에너지 방사선원과 방사선원의 위치에 따른 저평가 가능성이 낮은 것으로 모사하고 있음을 확인하였다 [37,40,42,43]. 따라서 국내원전에서 이러한 국제적 기준과 추세에 따라 가슴과 등 부위에 복수선량계를 패용하는 방법을 따르는 것이 더 적합한 것으로 판단되었다.

복수선량계 알고리즘의 적용성 시험에 참여한 종사자에 대해 방사선작업과정의 편리성 등을 확인하기 위한 간단한 인터뷰를 실시하였다[10]. 그 결과 TLD를 머리에 패용하는 경우 헬멧이나 방호용 모자에 테이프 등으로 고정해야하므로 이질감이 느껴지고 방사선작업에 지장을 줄 수도 있다는 의견이 제기되었다. 이에 비해 가슴과 등 부위에 패용하는 경우 작업자가 TLD 패용에 대한 이질감을 느끼지 않아 방사선작업에 지장이 전혀 없고, 더욱 TLD와 ADR 고정 주머니를 방호복 앞면과 뒷면에 설치할 경우 TLD와 ADR의 탈착과 이에 따른 분실 위험 등이 없어지므로 관리측면에서 더 안전한 것으로 확인되었다. 이는 방사선작업에서의 편의성뿐만 아니라, 보수작업의 품질에도 영향을 미치는 사항으로 판단되었다. 이러한 관리적 측면 등을 종합적으로 고려하여 복수선량계는 가슴과 등에 패용하는 것으로 결정하였다.

그런데 선행연구자의 연구결과에서 머리와 가슴에 패용하는 캐나다 OPG 알고리즘과 ANSI 알고리즘은 방사선원이 위쪽이 아닌 작업종사자의 앞쪽이나 뒤쪽에 위치할

경우 유효선량을 정확하지 못하게 평가 될 수 있다는 의견을 제시하고 있어, 이들 두 알고리즘은 제외하였다. 특히 복수선량계를 패용하고 적용성 시험에 참여한 작업종사자의 인터뷰 결과 작업의 편리성 측면에서 가슴과 등 부위에 TLD 패용을 더 선호하는 것으로 확인되었다. 또한 미국 NRC와 NCRP 등에서도 머리와 등 부위에 선량계를 패용하도록 권고하고 있어 국내원전에서도 이러한 국제적 기준과 추세를 따르고자 하였다. 이러한 점을 종합적으로 고려하여 복수선량계의 패용위치는 가슴과 등 부위에 패용하는 것으로 확정하였다[10]. 이러한 가슴과 등의 판독값을 기준으로 하는 복수선량계 알고리즘에 대해 기술적인 특성, 방사선원 위치에 따른 영향과 NCRP의 저에너지 방사선원의 저평가 특성 등을 종합적으로 고려하였다[37]. 그 결과 미국방사선방호위원회(NCRP)에서 권고한 NCRP(55/50) 알고리즘이 가장 적절한 것으로 평가되었다. 특히 이 알고리즘은 가장 권위가 있는 미국의 방사선방호위원회 같은 국제 공인기관에서 발행 권고된 것이어서 국제기준 등에 부합되고 견고한 기술적 배경 및 신뢰성이 충분히 있다고 판단되었다[10].

한편 복수선량계 알고리즘을 제시한 저자나 기관의 기술적 배경이나 국제적 공신력 등도 고려되었다[10]. 이를 위해 국내 원전의 실무자와 대학 전문가의 자문과 규제기관에 대한 설명회 등의 과정을 거쳤다. 그 결과 최종적으로 NCRP에서 제안하는 알고리즘을 채택하는 것이 가장 적절하다고 판단되었다. 그런데 NCRP에서는 두개의 복수선량계 알고리즘(70/30, 55/50)을 제시하고 있으나, 최종적으로는 NCRP(55/50) 알고리즘이 저에너지 영역에서 NCRP(55/50) 알고리즘이 유효선량이 크게 과소평가하지 않는다고 결론짓고 있어, 이를 최종 선정하였다[10,37].

또한 복수선량계의 지급조건을 정하기 위해 INPO의 방사선방호지침을 검토하여 계속 적용할 필요가 있다고 판단되었다. 다만 INPO 방사선방호지침의 1990년대에 발행된 지침이고 미국에서 ICRP 60의 작업종사자 선량한도 연평균 20 mSv를 적용하지 않음에 비추어볼 때 단일작업에서 받는 피폭방사선량의 예상값 3 mSv에 대한 지급조건의 재검토가 필요하다고 판단되었다[10,20]. 이를 위해 선량한도의 10 % 수준인 단일작업 2 mSv를 우선 결정하고, 원전의 고피폭작업에서 단일 2 mSv를 초과하는 비율을 조사하였다[10]. 이러한 결과를 종합하여 최종적으로 단일작업 2 mSv 이상 피폭



방사선량을 받을 것으로 예상되는 자를 대상으로 복수선량계 지급조건으로 결정하였다. 이러한 지급조건에 대한 규제기관과 지속적으로 협의하였다. 그 결과 단일 작업 2mSv 이상의 피폭에 대해 선량을 조건은 방사선량을 조건 1 mSv/hr는 계속 유지하되, 국제적 기준과 선량관리의 강화를 고려하여 신체부위별로 피폭 방사선량이 50 % 이상 차이가 나는 경우에서 30 %로 하향 조정하였다[10,20,38].

한편 ICRP에서는 기존의 방사선방호지침인 ICRP 60을 개정하여 2007년 ICRP 103을 새로이 권고하였다[7]. 이에 따라 복수선량계 적용시험 실시단계에서 ICRP 103 권고의 적용 타당성을 고려한 바는 있으나, 현재 국내 원자력법령에 이를 반영하고 있지 않아 최종 적용하지 않았다. 다만 ICRP 103을 국내 법령에 반영하기 위한 초기 단계의 연구가 진행 중에 있어 국내 원자력법령에 반영될 것이 예상되므로, ICRP 103의 권고를 반영하여 복수선량계 알고리즘이 새로이 개정되어야 할 것으로 판단되었다. 이러한 ICRP 103 적합성 검토는 별도로 수행하였다[14,25].

상기와 같은 내용을 근거로 국내 원전의 복수선량계에 관한 피폭방사선량 평가 절차를 통일되게 개정하였고, 2006년부터 원전 방사선피폭평가의 실무과정에 적용하고 있다. 이러한 개선으로 원전 불균일 방사선작업과정에서 종사자의 피폭방사선량을 신뢰성 있게 유효선량에 맞추어 평가할 수 있는 토대를 구축하였고, 또한 국제적 기관인 ICRP 및 NCRP 기준과 상호 조화를 이루는 방향으로 원전의 피폭방사선량평가 절차를 개선하는데 일조를 하였다고 판단되었다[10].

표 5.2 TLD and ADR readouts for the installation of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 2

User	TLD readout			ADR readout		
	Head	Chest	Back	Head	Chest	Back
A	4.25	2.96	3.68	4.47	3.36	4.03
B	2.60	2.09	2.71	2.85	2.25	2.99
C	2.41	1.90	2.13	2.65	1.97	2.57
D	2.29	1.57	2.07	2.68	1.93	2.37
E	3.57	2.73	3.69	4.02	2.94	4.16
F	2.73	1.80	2.25	2.87	1.99	2.75
G	3.51	2.62	3.02	4.03	2.68	3.65
H	2.00	1.75	2.00	2.23	1.79	2.18
I	2.19	1.81	2.09	2.53	1.90	2.42
J	1.93	1.71	2.04	2.26	1.87	2.30
K	2.34	1.71	2.24	2.56	1.77	2.42
L	1.82	1.52	1.86	2.06	1.61	2.17
M	2.02	1.50	1.97	2.28	1.73	2.21
N	4.22	3.64	4.66	4.88	3.71	5.83
O	2.21	1.69	2.11	2.50	1.84	2.43
P	1.88	1.44	1.85	2.30	1.50	2.17
Q	1.31	0.96	1.18	1.44	0.99	1.45
R	0.73	0.48	0.65	0.74	0.51	0.71
S	1.23	0.92	1.00	1.44	0.97	1.19
T	0.76	0.54	0.65	0.85	0.61	0.77
U	1.51	1.00	0.34	1.69	0.80	0.50
V	0.00	0.10	0.00	0.08	0.12	0.08
W	0.12	0.18	0.08	0.19	0.24	0.13
X	0.12	0.11	0.00	0.17	0.15	0.11
Y	0.11	0.13	0.00	0.15	0.12	0.10
Z	0.12	0.15	0.13	0.19	0.20	0.16

“User” indicates the radiation workers (26 persons) who participated in the installation of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 2.

표 5.3 TLD and ADR readouts for the removal of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 2

User	TLD readout			ADR readout		
	Head	Chest	Back	Head	Chest	Back
A	1.82	1.50	1.64	1.99	1.61	2.09
B	1.76	1.58	1.68	1.98	1.66	1.96
C	1.68	1.24	1.48	2.02	1.38	1.84
D	1.75	1.27	1.60	1.93	1.49	1.87
E	2.01	1.48	1.68	2.25	1.50	1.97
F	1.69	1.49	1.60	1.88	1.61	1.93
G	1.52	1.13	1.31	1.68	1.49	1.21
H	1.69	1.30	1.57	1.96	1.56	1.98
I	1.22	0.81	0.92	1.37	0.91	1.06
J	2.32	1.79	1.98	2.89	1.90	2.40
K	0.00	0.00	0.00	0.05	0.06	0.04
L	0.00	0.00	0.00	0.06	0.06	0.05
M	0.09	0.09	0.00	0.09	0.11	0.07
N	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.04
O	0.00	0.00	0.00	0.07	0.08	0.06
P	0.14	0.12	0.00	0.15	0.12	0.09

<sup>a</sup> “User” indicates the radiation workers (16 persons) who participated in the removal of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 2.

<sup>b</sup> Users in Table 5.3 are different from those in Table 5.2. However, some workers who participated in the installation of a steam generator nozzle dam, and who were exposed to low effective dose equivalents, also took part in the removal of the steam generator nozzle dam.

표 5.4 Calculated effective dose equivalents from the installation of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 2

No. of TLD Wearers	Effective dose equivalent (mSv)						
	Maximum	ANSI	NCRP (70/30)	NCRP (55/50)	EPRI (Xu)	Lakshmanan	Kim
1	4.66	3.70	3.95	4.33	4.41	5.53	4.27
2	4.25	3.09	3.18	3.47	3.50	4.43	3.43
3	3.69	2.81	3.02	3.35	3.45	4.28	3.29
4	3.51	2.71	2.74	2.95	2.92	3.76	2.93
5	2.73	1.89	1.94	2.12	2.14	2.70	2.09
6	2.71	2.14	2.28	2.50	2.56	3.20	2.47
7	2.41	1.95	1.97	2.11	2.07	2.69	2.10
8	2.34	1.77	1.87	2.06	2.11	2.63	2.03
9	2.29	1.64	1.72	1.90	1.95	2.43	1.87
10	2.21	1.74	1.82	1.98	2.01	2.53	1.96
11	2.19	1.85	1.89	2.04	2.02	2.60	2.02
12	2.04	1.73	1.81	1.96	1.96	2.50	1.94
13	2.02	1.55	1.64	1.81	1.85	2.31	1.78
14	2.00	1.78	1.83	1.96	1.94	2.50	1.95
15	1.88	1.48	1.56	1.72	1.75	2.19	1.69
16	1.86	1.55	1.62	1.77	1.78	2.25	1.75
17	1.51	1.05	0.80	0.72	0.84	0.89	0.76
18	1.31	1.00	1.03	1.12	1.13	1.43	1.11
19	1.23	0.95	0.94	1.01	0.98	1.28	1.00
20	0.76	0.56	0.57	0.62	0.62	0.79	0.62
21	0.73	0.51	0.53	0.59	0.61	0.75	0.58
22	0.18	0.17	0.15	0.14	0.16	0.17	0.14
23	0.15	0.15	0.14	0.15	0.15	0.19	0.15
24	0.13	0.13	0.09	0.07	0.10	0.09	0.08
25	0.12	0.11	0.08	0.06	0.08	0.07	0.07
26	0.10	0.09	0.07	0.06	0.08	0.07	0.06

<sup>a</sup> “No. of TLD wearers” indicates the radiation workers (26 persons) who participated in the installation of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 2.

<sup>b</sup> “Maximum” indicates the maximum TLD readout from the head, chest, or back.

표 5.5 Calculated effective dose equivalents from the removal of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 2

No. of TLD wearers	Effective dose equivalent (mSv)						
	Maximum	ANSI	NCRP (70/30)	NCRP (55/50)	EPRI (Xu)	Lakshmana n	Kim
1	2.32	1.84	1.85	1.97	1.93	2.51	1.96
2	2.01	1.53	1.54	1.65	1.63	2.11	1.64
3	1.82	1.53	1.54	1.65	1.61	2.09	1.64
4	1.76	1.60	1.61	1.71	1.66	2.17	1.70
5	1.75	1.32	1.37	1.50	1.52	1.91	1.48
6	1.69	1.51	1.52	1.62	1.57	2.06	1.61
7	1.69	1.34	1.38	1.50	1.50	1.91	1.48
8	1.68	1.28	1.31	1.42	1.42	1.81	1.41
9	1.52	1.17	1.18	1.28	1.27	1.63	1.27
10	1.22	0.85	0.84	0.91	0.89	1.15	0.90
11	0.14	0.12	0.08	0.07	0.09	0.08	0.07
12	0.09	0.09	0.06	0.05	0.07	0.06	0.05
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

<sup>a</sup> “No. of TLD wearers” indicates the radiation workers (16 persons) who participated in the removal of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 2.

<sup>b</sup> “Maximum” indicates the maximum TLD readouts from the head, chest, or back.

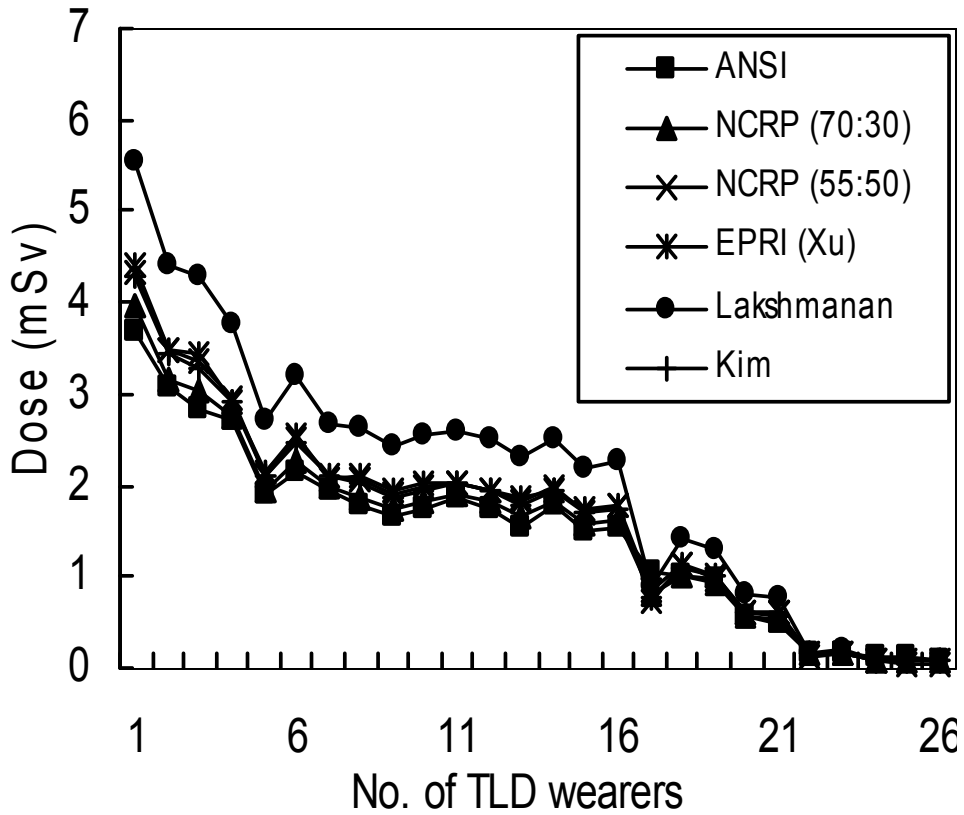


그림 5.2 Application of a two-dosimeter algorithm for the installation of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 2. “No. of TLD wearers” indicates the total number of radiation workers (26 persons) who participated in the installation of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 2, which is also referred to in Table 3. The results are displayed from high to low effective dose equivalent using six two-dosimeter algorithms based on TLD readouts from the head and chest or from the chest and back.

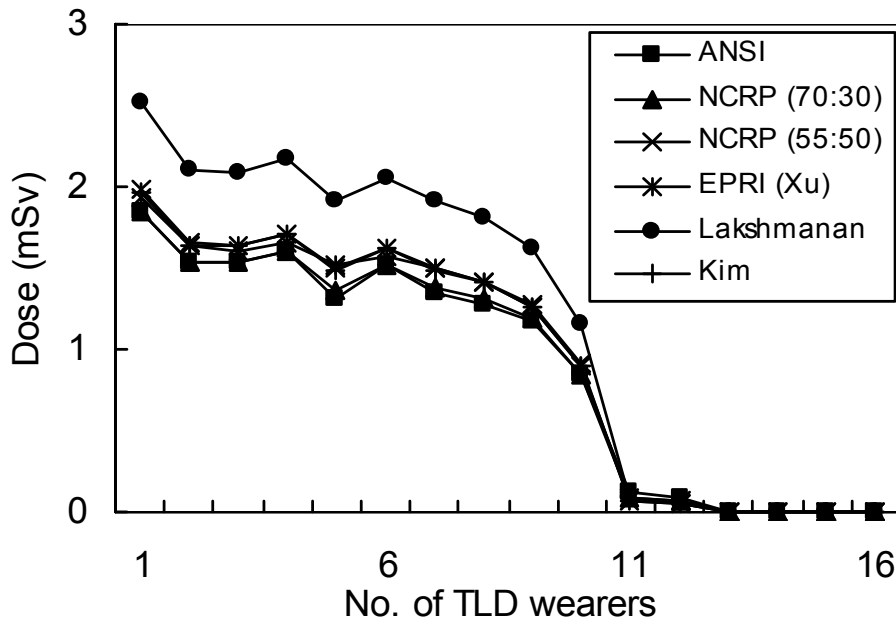


그림 5.3 Application of a two-dosimeter algorithm for the removal of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 2. “No. of TLD wearers” indicates the total number of radiation workers (16 persons) who participated in the removal of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 2, which is also referred to in Table 4. The results are displayed from high to low effective dose equivalent using six two-dosimeter algorithms based on TLD readouts from the head and chest or from the chest and back.

## 제4절 개발된 알고리즘의 국내원전 적용경험

개발된 복수선량계 알고리즘에 대해 2006년부터 국내원전에서 적용 중에 있다. 그 운영경험을 분석한 결과 잘 일치하는 것으로 판단되었다. 이를 각 원전에서 복수선량계 적용 결과를 그림 5.4에서 5.13에 제시하였다[12]. 한편 이들 그림 결과의 내용을 요약한 결과는 아래 표 5.6에 나타내었다[12].

표 5.6 Summary of Dose Distribution and Difference

NPP	Items of Radiation Work	General Trend of Dose Distribution <sup>a</sup>	Dose Difference <sup>b</sup>
Kori No. 1	Installation of Steam Generator Nozzle Dam	Chest < E < Back	10 ~ 30 %
Kori No. 1	Penetration Test of a Reactor Head	Chest < E < Back	5 ~ 15 %
Hanbit No. 1	Installation of Steam Generator Nozzle Dam	Chest < E < Back	10 ~ 30 %
Hanbit No. 1	Plugging and Nozzle Dam Removal	Chest < E < Back	10 ~ 30 %
Wolsong No. 1	Ultrasonic Test of Feeder Pipe	Back < E < Chest	5 ~ 15 %

<sup>a</sup> Chest = TLD readout on the chest, back = TLD readout on the back, E = calculated effective dose

<sup>b</sup> Dose difference = (maximum dose on the chest or back - minimum dose on the chest or back) / calculated effective dose



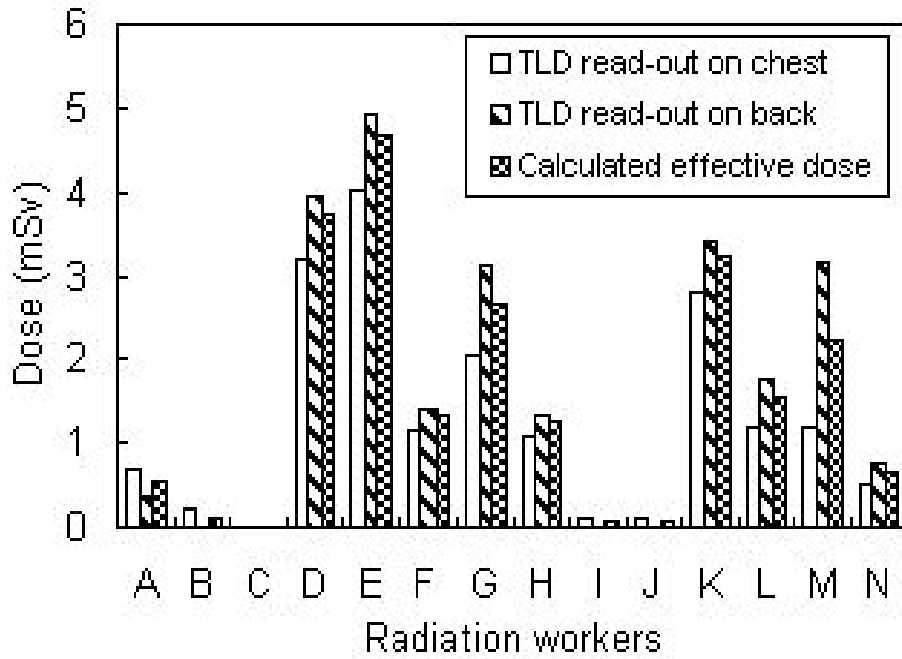


그림 5.4 TLD readouts for the installation of a steam generator nozzle dam at Kori NPP No. 1

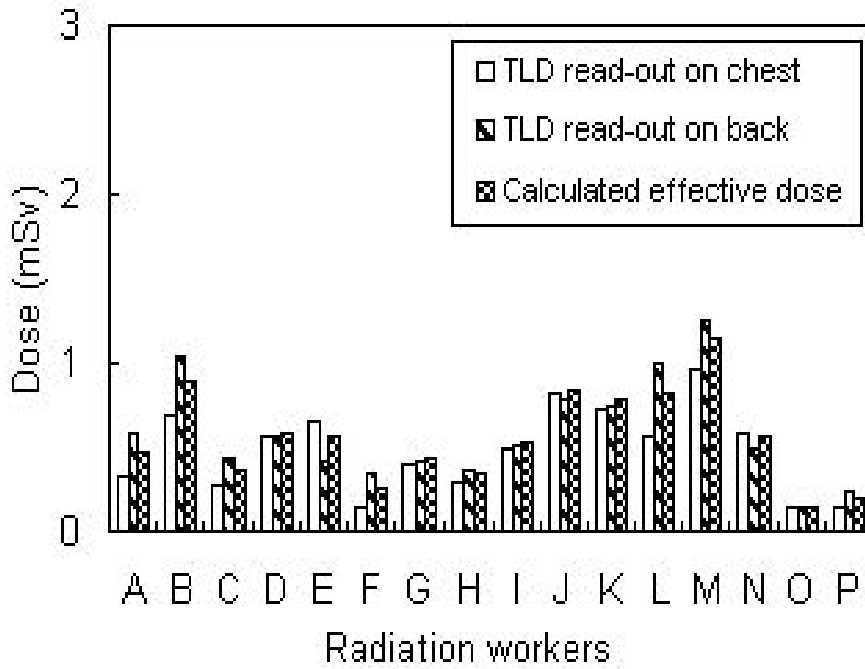


그림 5.5 TLD readouts for the penetration test of a reactor head at Kori NPP No. 1

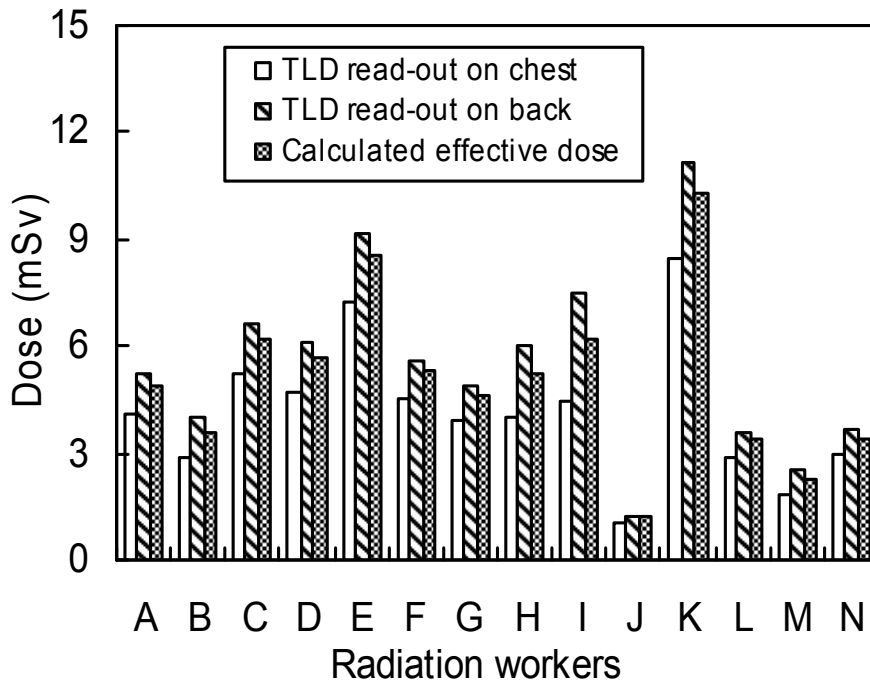


그림 5.6 TLD readouts for the installation of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 1

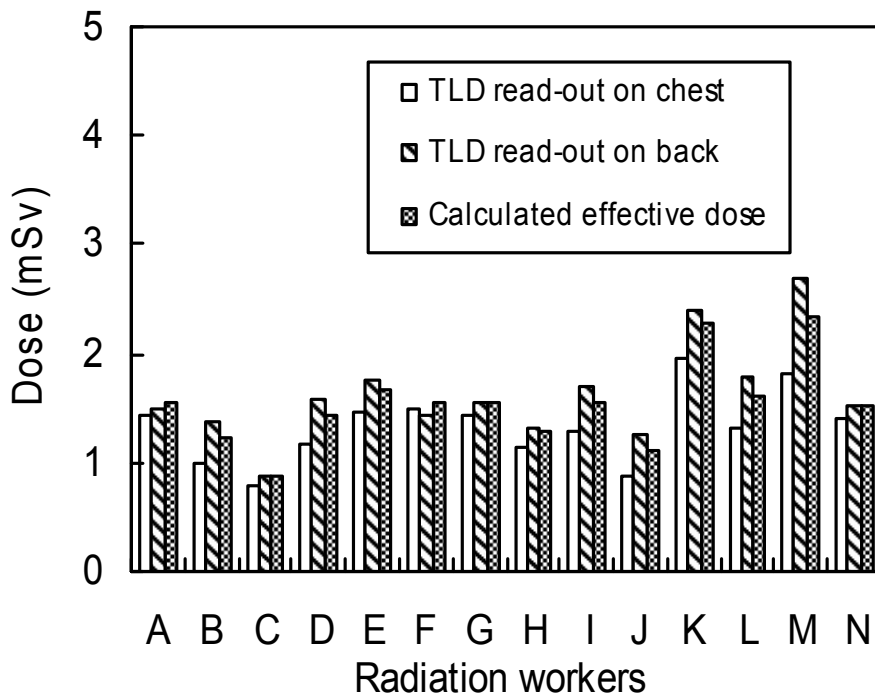


그림 5.7 TLD readouts for the plugging and nozzle dam removal of steam generator at Hanbit NPP No. 1

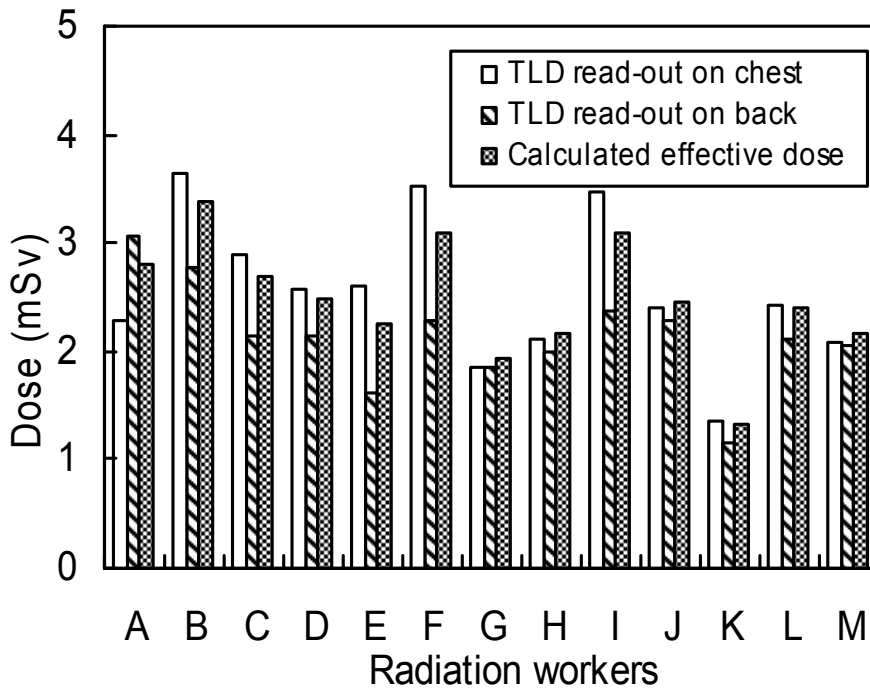


그림 5.8 TLD readouts for the ultrasonic test of feeder pipe at Wolsong NPP No. 1

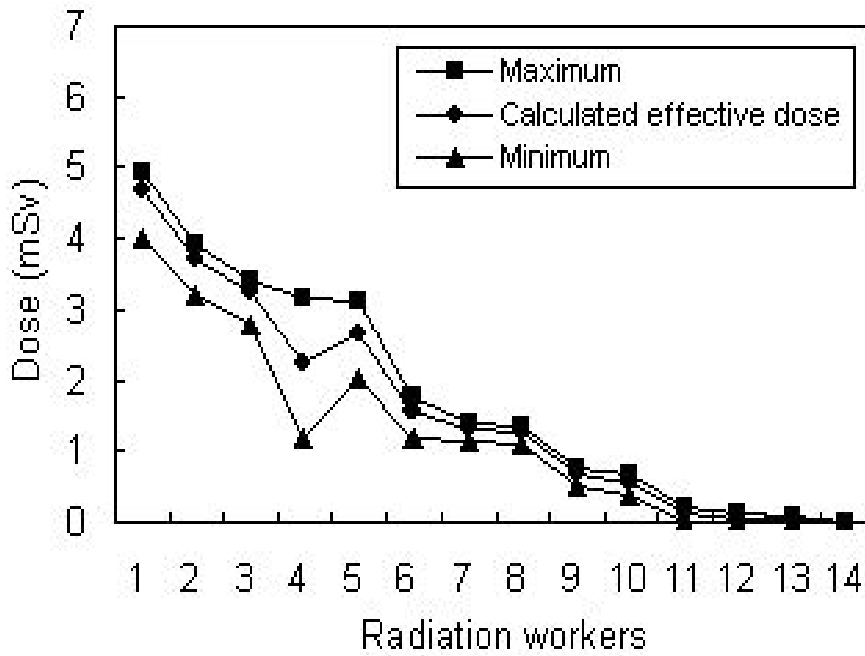


그림 5.9 Comparison of the maximum, minimum, and calculated deep dose from TLD readouts for the installation of a steam generator nozzle dam at Kori NPP No. 1

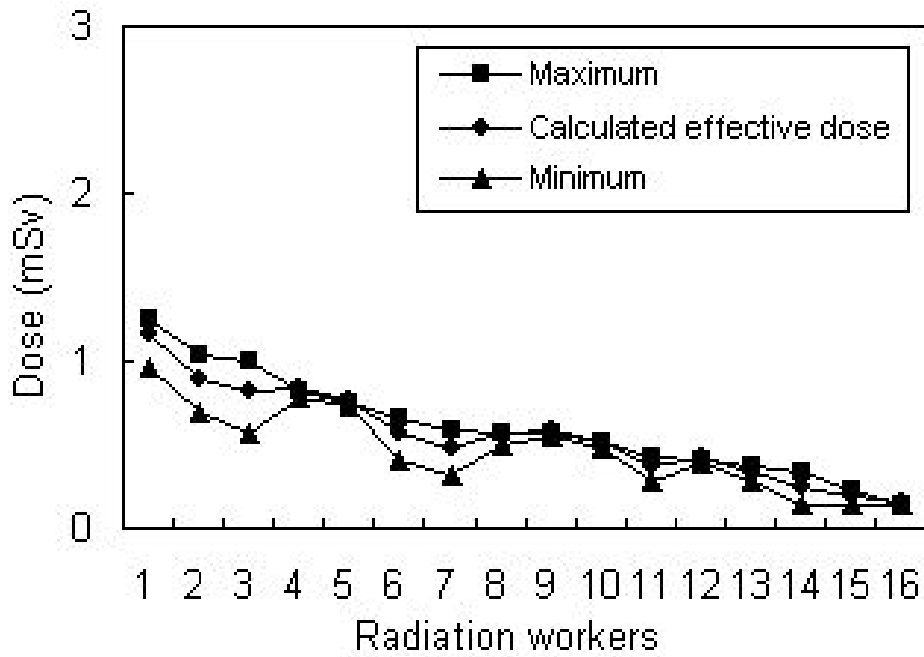


그림 5.10 Comparisons of the maximum, minimum, and calculated deep dose from TLD readouts for a penetration test of a reactor head at Kori NPP No. 1

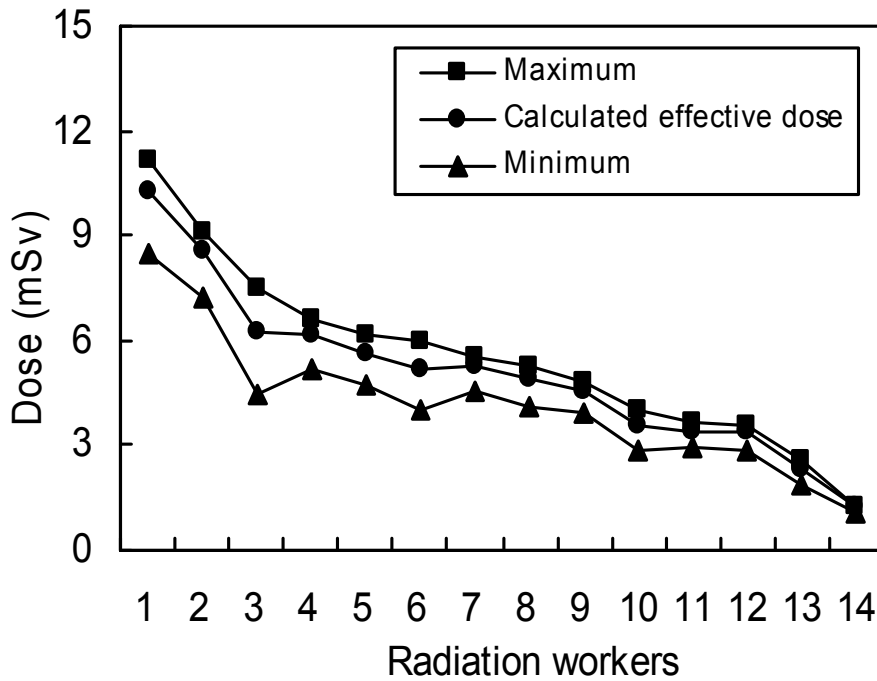


그림 5.11 Comparisons of the maximum, minimum, and calculated deep dose from TLD readouts for the installation of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP No. 1



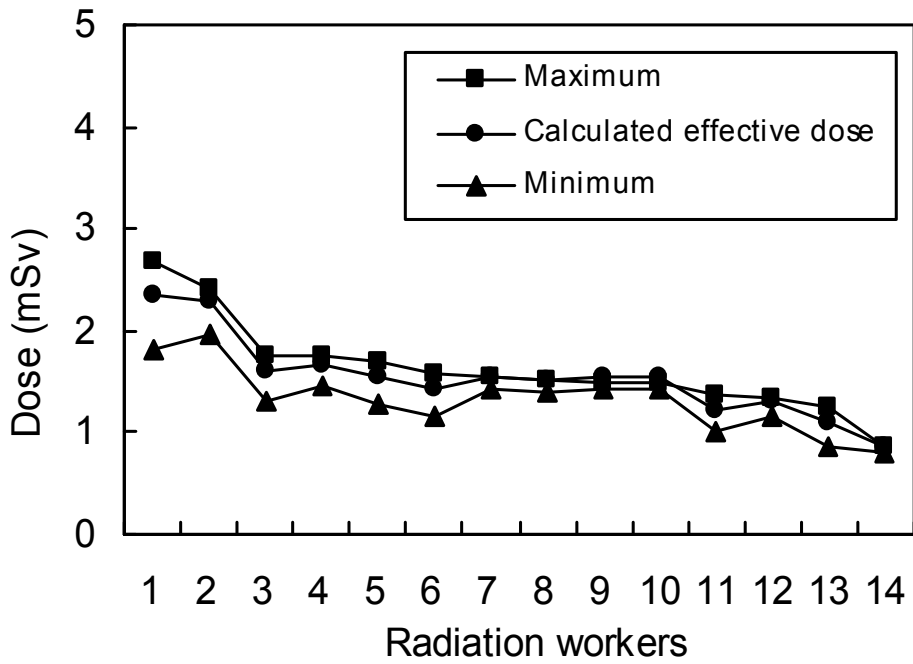


그림 5.12 Comparisons of the maximum, minimum, and calculated deep dose from TLD readouts for the plugging and nozzle dam removal of steam generator at Hanbit NPP No. 1

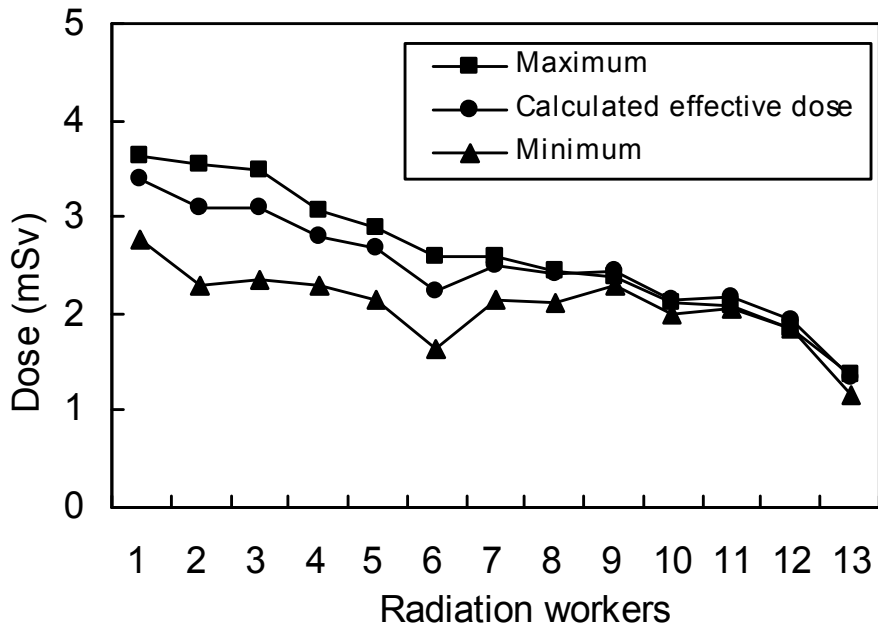


그림 5.13 Comparisons of the maximum, minimum, and calculated deep dose from TLD readouts for the ultrasonic test of feeder pipe at Wolsong NPP No. 1

## 제5절 ICRP 103 방사선방호 체계와의 적합성 검토

국내 원전에서 과거에 두 개의 TLD를 이용하여 피폭방사선량 평가를 수행하는 경우 두 개 TLD의 선량값 중에서 최대선량을 유효선량으로 평가하였다[10]. 그러나 이러한 최대선량 평가방식의 보수성을 인식하고 그 후 두 개 TLD의 선량 값의 가중치를 고려하는 복수선량계 알고리즘(Two-Dosimeter Algorithm : TDA)을 적용하였다[10]. 국내 원전에서는 2004-2005년 현장시험과 심층검토를 통해 NCRP (55/50) TDA를 최종적으로 선정하였고, 2006년 이후 원전의 피폭방사선량 평가 실무에 적용하고 있다[10]. 이러한 TDA의 적용으로 방사선작업종사자의 피폭방사선량을 보다 정확하게 평가할 수 있게 되었고, 방사선피폭평가의 신뢰성은 더욱 증진되었다[45].

이러한 TDA는 ICRP 26 유효선량당량(Effective dose equivalent: EDE) 또는 ICRP 60에서 정의한 유효선량(Effective dose: E)을 보다 정확하게 평가할 목적으로 도출된 것이다[10,37]. 한편 2007년 발행된 국제방사선방호위원회 ICRP 103에서는 방사선가중계수(Radiation weighting factor,  $W_R$ ), 조직가중계수(Tissue weighting factor,  $W_T$ ), 기준 인체모형팬텀(Reference phantom) 등의 변경으로 유효선량을 평가하는 개념이 일부 변경되었다. 이에 따라 NCRP (55/50) TDA에 대해 ICRP 103 방사선방호 체계 하에서 신뢰성 있게 적용할 수 있는지 검토해 볼 필요성이 있다고 판단되었다[45].

미국방사선방호위원회(National Council on Radiation Protection and Measurements : NCRP)는 고피폭 방사선환경에서 적용 가능한 두 종류의 복수선량계 알고리즘(TDA)를 제시하였다[37]. TDA 알고리즘 1은 가슴(정면) 부위 선량( $H_P(10)_{front}$ )에 70 %의 가중치를 부여하고, 등(뒷면) 부위 선량( $H_P(10)_{back}$ )에 30 %의 가중치를 부여하여 유효선량당량(Effective dose equivalent : EDE)을 계산하는 방식이다. TDA 알고리즘 2는 가슴(정면) 부위 선량( $H_P(10)_{front}$ )에 55 %의 가중치를 부여하고, 등(뒷면) 부위 선량( $H_P(10)_{back}$ )에 50 %의 가중치를 부여하여 유효선량당량을 계산하는 방식이다. 아래 식 (5.11)과 식 (5.12)에 두 종류의 TDA를 나타내었다.

$$H_E(\text{estimate}) = 0.70H_P(10)_{front} + 0.30H_P(10)_{back} \quad (5.11)$$

$$H_E(\text{estimate}) = 0.55H_P(10)_{\text{front}} + 0.50H_P(10)_{\text{back}} \quad (5.12)$$

이외에도 미국원자력규제위원회(United States Nuclear Regulatory Commission: USNRC)와 미국국립표준협회(American National Standards Institute: ANSI)에서도 고피폭 환경에서 적용 가능한 TDA를 제시하고 있다[10]. 또한 캐나다 원전에서는 ICRP 60에 근거하여 통일된 TDA를 방사선관리 실무에 적용하고 있는 것으로 조사되었다. 국내 원전에서는 현장시험과 심층 검토를 통해 식 (5.12)에서 제시한 NCRP (55/50) TDA를 최적 알고리즘으로 선정하였고, 2006년 이후 고피폭 예상 방사선작업 등의 실무에서 적용 중에 있다[10,14].

Kim 등은 가슴과 등에 패용한 개인선량계의 선량 값을 이용한 TDA에 대해 Monte Carlo dose calculation을 이용하여 알고리즘을 도출하였고, 지속적으로 발전시켜 왔다[46]. 특히 최근에는 ICRP 103 방사선방호 체계하에서 유효선량을 적절하게 평가할 수 있는 TDA를 제시하였다[46]. 여기에 따르면 ICRP 103 유효선량( $E(\text{estimate})$ )은 다음과 같이 식 (5.13)으로 계산된다.

$$E(\text{estimate}) = h(E)[\omega \times R_f + (1-\omega) \times R_b] \quad (5.13)$$

여기에서  $h(E)$ 는 기준 인체모형팬텀, 방사선에너지 및 입사방향 등을 고려한 보정인자이며,  $R_f$ 와  $R_b$ 는 각각 가슴과 등 부위가 받는 선량이며,  $\omega$ 는 입사방사선 가중인자의 Trial set이다[46].

Kim 등은 ICRP 기준 인체모형팬텀과 직육면체(Slab phantom) 팬텀을 이용하여 개인선량계를 교정한 경우의  $h(E)$ 를 각각 제시하고 있다[46]. 그런데, 원전에서는 개인선량계를 통상 PMMA (Poly methyl meta acrylate) 재질의 직육면체 팬텀을 이용하여 교정하고 있다. Kim 등은 직육면체 팬텀의 경우 0.08 MeV, 0.3 MeV, 1.0 MeV, 2.0 MeV 입사에너지에 대해  $h(E)$ 는 각각 1.08, 1.04, 1.02, 0.99임을 제시하였다[46]. 이 경우 Kim 등은 원전에서 방사선작업종사자에게 피폭을 주는 방사선의 에너지는 0.3

MeV 부근이며, 따라서  $h(E)$  값으로 1.04를 채택한 것으로 판단된다. 즉, 원전의 경우 다양한 방사성핵종과 고에너지가 방출되고 있으나, 방사선작업종사자에게 방사선피폭을 주는 입사에너지는 구조물 등에 의해 감쇄되어 0.3 MeV 부근의 고에너지 방사선장 (High energy photon field) 형태로 나타나고 있다[10,14]. 따라서  $h(E)$  값으로 1.04를 선택한 것은 적절하다고 판단된다. 따라서 Kim TDA는 아래와 같이 식 (5.14)로 표현된다[46].

$$E(\text{estimate}) = h(E)[\omega \times R_f + (1-\omega) \times R_b] = 1.04(0.6R_f + 0.4R_b) = 0.62R_f + 0.42R_b \quad (5.14)$$

국내원전에 적용할 최적의 TDA 선정을 위해 2004년 및 2005년에 한빛원전과 한울원전에서 현장시험을 실시하였다. 이 과정에서 가슴과 등에 패용한 TLD의 판독결과 피폭방사선량에 관한 많은 DB 자료를 축적하였다. 또한 2006년 국내원전에서의 NCRP (55/50) TDA 적용이후 DB 자료를 구축하였다. 이들 자료 중 2004년 및 2005년에 수행된 최적 TDA 선정을 위한 현장시험에서 취득한 선량에 대한 자료를 표 5.7에 나타내었다[14]. 또한 이들 두 TDA를 이용한 유효선량 계산결과를 표 5.8에 나타내었다. 한편 2006년 NCRP (55/50) TDA의 적용이후 원전 방사선작업 중에 높은 피폭방사선량을 받았던 가슴과 등 부위 열형선량계 판독 값을 표 5.9와 5.10에 나타내었다[14].

국내 원전에서 적용중인 NCRP (55/50) TDA와 Kim TDA (2011)는 모두 수치해석 시뮬레이션 과정을 거쳐 도출되었고, 두개의 선량계를 가슴과 등에 패용하는 점이 공통이라 할 수 있다[10]. 또한 두 개의 선량 값에 적절한 가중치를 고려하여 최종적인 선량을 계산하는 것 또한 동일하다. 그런데 최종적으로 도출되는 선량은 NCRP (55/50) TDA의 경우 유효선량당량(EDE)이며, Kim TDA의 경우는 ICRP 103에 근거한 유효선량(E)이다.

ICRP는 ICRP 26의 유효선량당량과 ICRP 60의 유효선량은 약간의 개념이 바뀌었을 뿐 거의 동일한 것으로 판단하고 있다[8]. 특히 원전과 같은 고에너지 광자방사선에 의한 방사선피폭이 대부분인 경우 TLD를 이용하여 측정된 10 mm 개인선량당량

(Personal dose equivalent)은 유효선량과 거의 차이가 없다고 제시하고 있다[7]. 특히 2010년 Kim 등은 NCRP (55/50) TDA에 근거하여 도출된 동일 선량계산 결과를 이용하여 ICRP 26의 유효선량당량과 ICRP 60에 의한 유효선량을 정확하고 신뢰성 있게 평가할 수 있는 것으로 제시하고 있다[10]. 그러나 10 mm 개인선량당량( $H_p(10)$ )과 ICRP 103의 유효선량(E)과 비교 또는 ICRP 60의 유효선량과 ICRP 103의 유효선량을 정량적으로 비교한 논문 등은 아직 발간되지 않고 있다.

2004년 및 2005년에 수행된 최적 TDA 선정을 위한 현장시험 DB를 이용하여, NCRP (55/50) TDA에 근거한 ICRP 26의 유효선량당량과, Kim TDA (2011)에 근거한 ICRP 103 유효선량을 계산하였다. 그 결과 두개의 TDA를 이용한 유효선량 계산 값의 차이는 5 % 미만으로 거의 유사하게 나타났다.

한편 2006년 NCRP (55/50) TDA 적용이후 높은 피폭방사선량을 받았던 방사선작업 종사자의 가슴과 등 부위 열형광선량계 판독 값을 이용하여, NCRP (55/50) TDA와 Kim TDA (2011)에 근거한 ICRP 26 유효선량당량과 ICRP 103 유효선량을 계산하였다. 그 결과도 5 % 이내로 일치함을 확인하였다. 이를 표 5.9와 5.10에 나타내었다 [14]. 특히 NCRP (55/50) TDA에 의한 선량 값은 Kim TDA (2011)에 비해 약간의(최대 5 % 이내) 보수성을 갖고 있는 것으로 나타나 피폭방사선량 평가의 신뢰성을 보유하고 있음을 확인하였다.

여기에서 하나 특이한 점은 증기발생기 수실과 같이 좁은 밀폐 공간에서 이루어지는 방사선작업의 경우 방사선작업종사자의 동선에 따라 가슴 또는 등 부위 선량이 높게 나타났다[10,14]. 즉, 방사선원이 위쪽의 U-tube에 위치하고 있어 방사선흐름이 위에서 아래로 형성되고 증기발생기 벽에 의한 산란방사선의 영향으로 작업종사자의 작업 동선에 따라 가슴 또는 등 부위 선량이 임의적으로 높게 발생됨을 확인하였다. 이에 비해 월성 1호기 냉각재 모관 비파괴 검사와 같이, 넓고 개방된 공간에서 이루어지는 작업은 주로 가슴 부위의 선량이 대부분 높게 나타났다. 이에 따라 NCRP (55/50) TDA와 Kim TDA (2011)에 의한 유효선량 계산 값은 미세한 차이를 보이는 것으로 확인되었다.

표 5.7 TLD Readouts of Field Tests in 2004–2005 (Installation of a Steam Generator Nozzle Dam at Hanbit NPPs Unit 4 During the Maintenance Period)

Personal Name	TLD Readout(mSv)*			ADR Readout(mSv)†		
	Head	Chest	Back	Head	Chest	Back
A	4.25	2.96	3.68	4.47	3.36	4.03
B	2.60	2.09	2.71	2.85	2.25	2.99
C	2.41	1.90	2.13	2.65	1.97	2.57
D	2.29	1.57	2.07	2.68	1.93	2.37
E	3.57	2.73	3.69	4.02	2.94	4.16
F	2.73	1.80	2.25	2.87	1.99	2.75
G	3.51	2.62	3.02	4.03	2.68	3.65
H	2.00	1.75	2.00	2.23	1.79	2.18
I	2.19	1.81	2.09	2.53	1.90	2.42
J	1.93	1.71	2.04	2.26	1.87	2.30
K	2.34	1.71	2.24	2.56	1.77	2.42
L	1.82	1.52	1.86	2.06	1.61	2.17
M	2.02	1.50	1.97	2.28	1.73	2.21

\* TLD : Thermoluminescent Dosimeter

† ADR : Auto Dosimetric Reader

표 5.8 Comparison of calculated EDE and E Based on the TLD Readouts of Field Tests in 2004–2005 (Installation of a Steam Generator Nozzle Dam at Hanbit NPPs Unit 4 During the Maintenance Period)

Personal Name	TLD Readout* (mSv)			EDE* or E <sup>†</sup> (mSv)		
	Head	Chest	Back	Maximum Dose	NCRP(55/50) TDA(EDE)	Kim TDA (2011) (E)
A	4.25	2.96	3.68	4.25	3.47	3.38
B	2.60	2.09	2.71	2.71	2.50	2.43
C	2.41	1.90	2.13	2.41	2.11	2.07
D	2.29	1.57	2.07	2.29	1.90	1.84
E	3.57	2.73	3.69	3.69	3.35	3.24
F	2.73	1.80	2.25	2.73	2.12	2.06
G	3.51	2.62	3.02	3.51	2.95	2.89
H	2.00	1.75	2.00	2.00	1.96	1.92
I	2.19	1.81	2.09	2.19	2.04	2.00
J	1.93	1.71	2.04	2.04	1.96	1.92
K	2.34	1.71	2.24	2.34	2.06	2.00
L	1.82	1.52	1.86	1.86	1.77	1.72
M	2.02	1.50	1.97	2.02	1.81	1.76

\* EDE : Effective Dose Equivalent

<sup>†</sup> E : Effective Dose based on ICRP 103



표 5.9 Comparison of calculated EDE and E Based on the TLD Readouts of Field Tests in 2006–2007 (Installation of a Steam Generator Nozzle Dam at Hanul Units 1 & 2)

Personal Name	TLD Readout* (mSv)		EDE* or E <sup>†</sup> (mSv)	
	Chest	Back	NCRP(55/50) TDA(EDE)	Kim TDA (2011) (E)
a	4.68	5.94	5.54	5.40
b	2.39	2.92	2.77	2.71
c	2.80	3.59	3.34	3.24
d	2.49	3.22	2.98	2.90
e	2.60	3.63	3.25	3.14
f	1.01	1.35	1.23	1.19
g	3.15	4.21	3.84	3.72
h	3.77	5.16	4.65	4.50
i	2.84	3.51	3.32	3.23
j	0.96	1.21	1.13	1.10
k	4.93	6.89	6.16	5.95
l	4.51	6.08	5.52	5.34
m	2.01	2.93	2.57	2.48

\* EDE : Effective Dose Equivalent

† E : Effective Dose based on ICRP 103

표 5.10 Comparison of calculated EDE and E Based on the TLD Readouts of Field Tests in 2007 (UT Tests of Coolant Tube Nozzle at Wolsong Unit 1)

Personal Name	TLD Readout* (mSv)		EDE* or E <sup>†</sup> (mSv)	
	Chest	Back	NCRP(55/50) TDA(EDE)	Kim TDA (2011) (E)
1	2.29	3.07	2.80	2.71
2	3.63	2.77	3.39	3.41
3	2.90	2.15	2.68	2.70
4	2.58	2.15	2.50	2.50
5	2.59	1.63	2.24	2.29
6	3.53	2.29	3.09	3.15
7	1.84	1.85	1.94	1.92
8	2.10	1.99	2.16	2.14
9	3.48	2.36	3.09	3.15
10	2.39	2.28	2.45	2.44
11	1.37	1.16	1.33	1.33
12	2.43	2.12	2.40	2.40
13	2.09	2.06	2.18	2.16

\* EDE : Effective Dose Equivalent

† E : Effective Dose based on ICRP 103

## 제6장 고평폭 접촉작업의 등가선량 평가

### 제1절 말단선량 평가기준과 개인선량계

원전 계획예방정비기간 증기발생기 수실작업, 가압기 전열관 교체작업 또는 가압중수로원전의 압력관 피더(Pressure tube feeder) 제거작업 등은 높은 방사선량률을 나타내는 구역이다[10]. 특히 이들 작업은 방사성물질과 매우 근접하여 작업이 이루어지기 때문에, 비교적 짧은 시간 작업에도 불구하고, 높은 피폭을 받을 가능성이 있다. 따라서 이러한 고평폭 작업에서는 가슴과 등 부위에 각각 개인선량계를 패용하여 원전종사자가 받는 선량을 적절히 평가하고 있다[10,45,47].

한편 계획예방정비과정에서 방사성물질과 접촉가능성이 높은 손이 고평폭방사선량을 받을 수 있다. 이에 따라 미국원자력발전자협회(Institute of Nuclear Power Operations : INPO)나 세계원자력발전자협회(World Association of Nuclear Operators : WANO)등에서 발간한 원전종사자 방사선관리 지침에 따르면 말단선량계를 이용하여 손과 발이 받는 등가선량을 유효선량 평가와 구분하여 별도로 평가하도록 권고하고 있다[15,16].

방사선작업종사자에 대한 유효선량(Effective Dose) 한도는 5년간 100 mSv를 제한값으로 정하고 있다[3]. 이러한 유효선량은 방사선방호 목적에서 적용하는 이론적인 단위로서 실무적으로 직접 측정이 불가능하다. 따라서 국제방사선도량형위원회(ICRU)에서는 인체 1 cm 깊이에서 조직이 받는 심부선량(Deep dose)을 측정하고, 이를 유효선량으로 평가하도록 규정하고 있다[3,7,8]. 통상적으로 심부선량 측정에는 TLD와 같은 개인선량계를 이용하며, 인체조직 1 cm 깊이에 해당되는 차폐물질을 TLD 형광체 앞뒤면에 설치하여 심부선량을 측정하고 있다[10]. 교육과학기술부 고시에서 심부선량은 국제방사선도량형위원회(ICRU)가 정하는 Hp(10)으로 정의하고 있다[9].

한편 인체조직에 대한 등가선량(Equivalent dose) 한도로 수정체(Lens of the eye)는 연간 150 mSv로 정하고 있으며, 피부(Skin)에 대해서 연간 500mSv로 정하고 있다. 한편 손과 발(Hands and feet), 즉 말단(Extremity)에 대해서는 연간 500mSv를

등가선량의 한도로 정하고 있다[3,7]. 전신에 대한 심부선량은 대부분의 각 국가에서 법적으로 평가하도록 규정하고 있으나, 등가선량에 대해서는 대부분 법적으로 선량평가를 요구하고 있지 않는 실정이다.

말단선량평가의 기술적 성능을 검증하기 위한 대표적 기술기준으로 미국 표준기술협회의 ANSI N 13.32-1995를 들 수 있다[49]. 본 기술기준에서는 방사선작업종사자의 말단이 받는 피폭방사선량 평가의 기술적인 성능을 검증하기 위한 목적으로 제정되었는데, 시험범주, 조사시험 범위, 허용준위 등을 구체적으로 제시하고 있다. 말단선량평가에 대한 기준 값이는 ICRP와 ICRU의  $7 \text{ mg/cm}^2$ 를 근거로 하고 있다. 한편 말단선량계의 성능평가에 대한 시험기준은 미국이나 국내에서 아직까지 원자력법 등에 반영되지 않고 있는 실정이다. ANSI N 13.32-1995에서 제시하고 있는 시험범주, 방사선종류(에너지), 시험범위와 허용기준을 표 6.1에 제시하였다[49].

국내원전에서는 종사자의 심부선량(Deep dose)을 평가하기 위해 Panasonic과 Harshaw 등 두 종류의 TLD와 판독장비를 갖추고 있다. 고리 1발전소, 월성 1발전소, 한빛 1발전소, 한빛 2발전소, 한울 3발전소에서는 Panasonic TLD를 보유하고 있고, 고리 2발전소, 월성 2발전소, 한빛 3발전소, 한울 1발전소, 한울 2발전소에서는 Harshaw TLD를 갖추고 있다. 이들 개인선량계는 다른 필터 두께를 이용하여 종사자가 피폭 받은 방사선의 에너지를 분해하고 선량평가 알고리즘을 이용하여 피폭방사선량을 체계적으로 추정할 수 있다[17-19].

한편 국내 원전에서 Panasonic TLD를 사용하는 원전은 UD-807 TLD를 말단선량계로 보유하고 있다. UD-807 선량계는 1개의 소자(Element 1) 만을 가지고 있으며, 형광체로는 Lithium Borate( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ )를 채택하고 있다. 이 형광소자는 조그만 원형으로 제작되며, 주로 반지모양의 Ring에 삽입하여 사용하고 있다. 한편 Harshaw TLD를 사용하는 원전에서는 Lithium Fluoride(LiF)를 형광소자로 채택한 TLD-100 말단선량계로 보유하고 있다. Harshaw 선량계는 외형에 따라 반지모양 선량계(DXTRAD)와 밴드모양 선량계(EXTRAD)로 구분된다. 이들 Panasonic TLD와 Harshaw TLD를 그림 6.1, 6.2, 6.3에 나타내었다[17-19].

표 6.1 Irradiation categories (ANSI N13.32–1995, performance testing of extremity dosimeters)

Test category	Energy	Test range	Tolerance level	Additional limit on  B  and S
I. High-dose category				
A. Low-energy photons only M150	70 keV(average)	0.1 to 5 Gy (10 to 500 rad)	0.30	None
B. High-energy photons only <sup>137</sup> Cs	662 keV	0.1 to 5 Gy (10 to 500 rad)	0.30	None
C. General, low and high energy photons M150 <sup>137</sup> Cs	70 keV(average) 662 keV	0.1 to 5 Gy (10 to 500 rad)	0.30	None
II. Low-energy photons (NIST-filtered techniques)				
A. General M30 M60 M100 M150 H150	20 keV(average) 34 keV(average) 51 keV(average) 70 keV(average) 117 keV(average)	0.0025 to 0.1 Sv (0.25 to 10 rem)	0.50	0.35
B. High-energy M100 M150 H150	51 keV(average) 70 keV(average) 117 keV(average)	0.0025 to 0.1 Sv (0.25 to 10 rem)	0.50	0.35
III. High-energy photons				
<sup>137</sup> Cs <sup>60</sup> Co	662 keV 1.25 MeV	0.0025 to 0.1 Sv (0.25 to 10 rem)	0.50	0.35
IV. Beta particles				
A. Low-energy only ( <sup>204</sup> Tl)	0.76 MeV(maximum)			0.35
B. High-energy only ( <sup>90</sup> Sr/ <sup>90</sup> Y)	2.3 MeV(maximum)	0.0025 to 0.1 Sv (0.25 to 10 rem)	0.50	0.35
C. General ( <sup>90</sup> Sr/ <sup>90</sup> Y and <sup>204</sup> Tl)	2.3 MeV(maximum) 0.76 MeV(maximum)			None
D. Slab uranium	2.3 MeV(maximum)			0.35

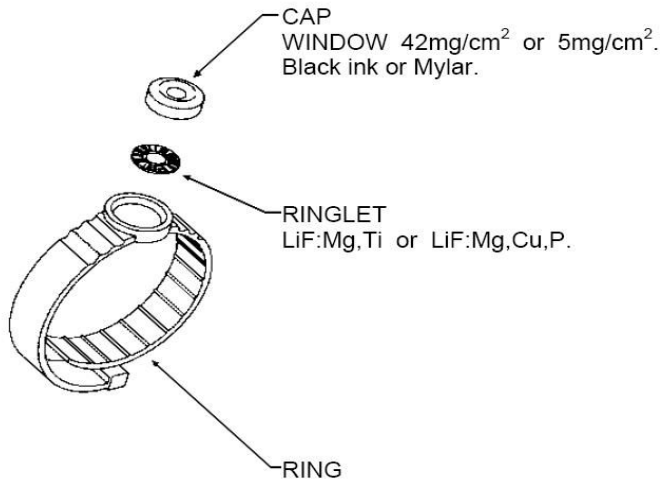


그림 6.1 Harshaw DXTRAD extremity dosimeter

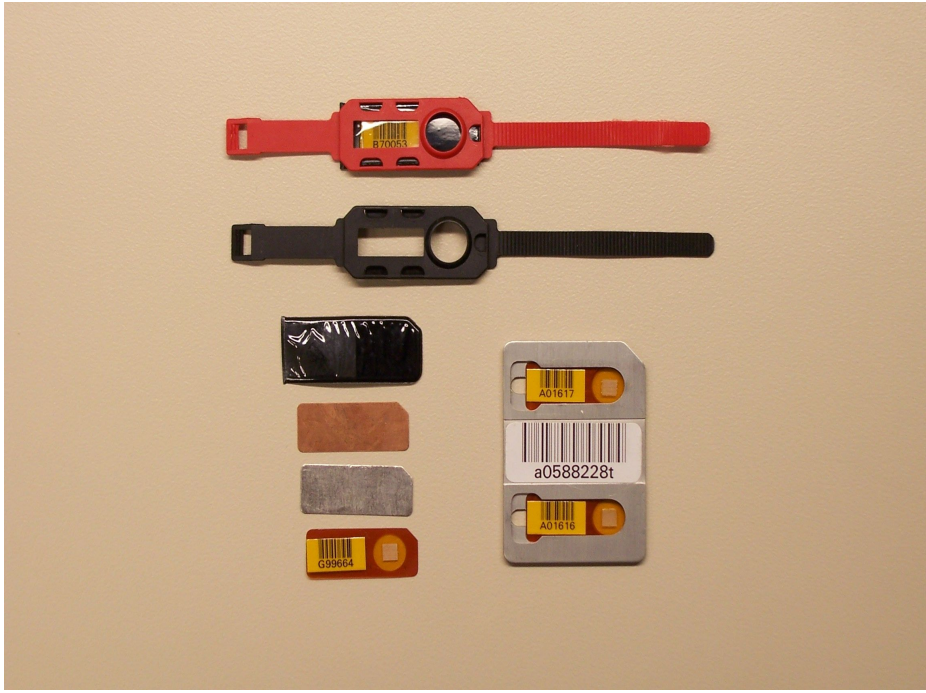


그림 6.2 Harshaw EXTRAD extremity dosimeter

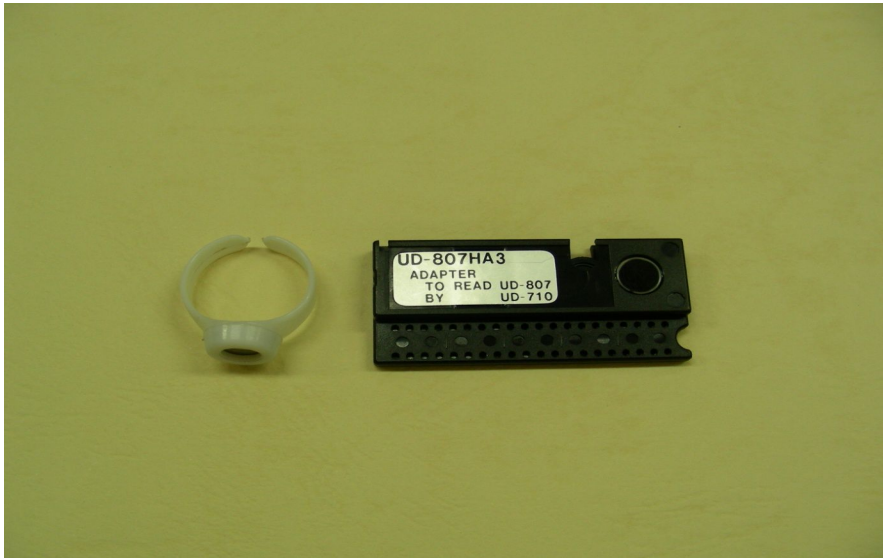


그림 6.3 Panasonic UD-807 dosimeter and readout case



## 제2절 말단선량계 소자보정

국내원전에서는 종사자의 피폭방사선량을 측정하기 위해 Panasonic과 Harshaw 등 두 종류의 TLD와 판독시스템(Reader system)을 갖추고 있다[50]. 고리 1발전소, 월성 1발전소, 한빛 1발전소, 한빛 2발전소, 한울 3발전소에서는 Panasonic TLD 시스템을 보유하고 있고, 고리 2발전소, 월성 2발전소, 한빛 3발전소, 한울 1발전소, 한울 2발전소에서는 Harshaw TLD 시스템을 갖추고 있다[50]. 따라서 이번 현장시험에는 Harshaw EXTRAD와 Panasonic UD-807 말단선량계가 이용되었다[50].

한편 이들 말단선량계는 현장시험에 사용하기에 앞서 열형광소자의 반응도를 보정하는 소자보정인자(Element correction factor or element correction coefficient) 산출과정을 거쳤다. 이러한 소자보정인자 산출은 현재 국내원전에서 종사자의 심부선량 측정에 사용되는 전신선량계의 소자보정인자 산출과정과 동일한 방법을 적용하였다. 그 결과 대부분 Harshaw 선량계는 10 % 이내의 소자반응도를 나타냈다[17,50]. 그렇지만 Panasonic 선량계는 소자보정인자의 분포가 폭넓게 분포하는 것으로 나타났으나, 소자보정을 통해 편차를 줄일 수 있어, 등가선량을 평가하는 방사선관리 실무에서는 문제되지 않았다[17,50]. 그림 6.4에 소자보정인자 산출방법, 그림 6.5와 6.6에 각각 Harshaw 및 Panasonic 말단선량계의 소자보정인자 산출결과를 나타내었다.

이들 말단선량계에 대해 표준방사선장에 대한 조사시험을 수행하였고, 반응도를 산출하였다[17,50]. 말단선량계 반응도 산출에는 한국원자력연구원이 보유하고 있는 국제기관과 소급성이 유지되는 표준방사선장과 국제표준기구(International Organization for Standardization: ISO)와 미국국립표준연구소(National Institute of Standard and Technology: NIST) 규격의 손가락 팬텀(Finger phantom) 등을 이용하였다. 그림 6.7에 반응도 시험에 이용된 손가락팬텀을 나타내었다. 표준방사선장의 저에너지 광자로 M30, M60, M100, M150, H150 방사선장 등이 이용되었으며, 고에너지 광자로  $^{137}\text{Cs}$  과 베타선으로  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  선원 등이 이용되었다. 표준방사선장 조사시험과 반응도 산출과정은 2회로 나누어 수행되었다. 표 6.2에 Harshaw 및 Panasonic 말단선량계의 국내 표준방사선장에 대한 반응도 시험 분석결과를 나타내었다[17,50].

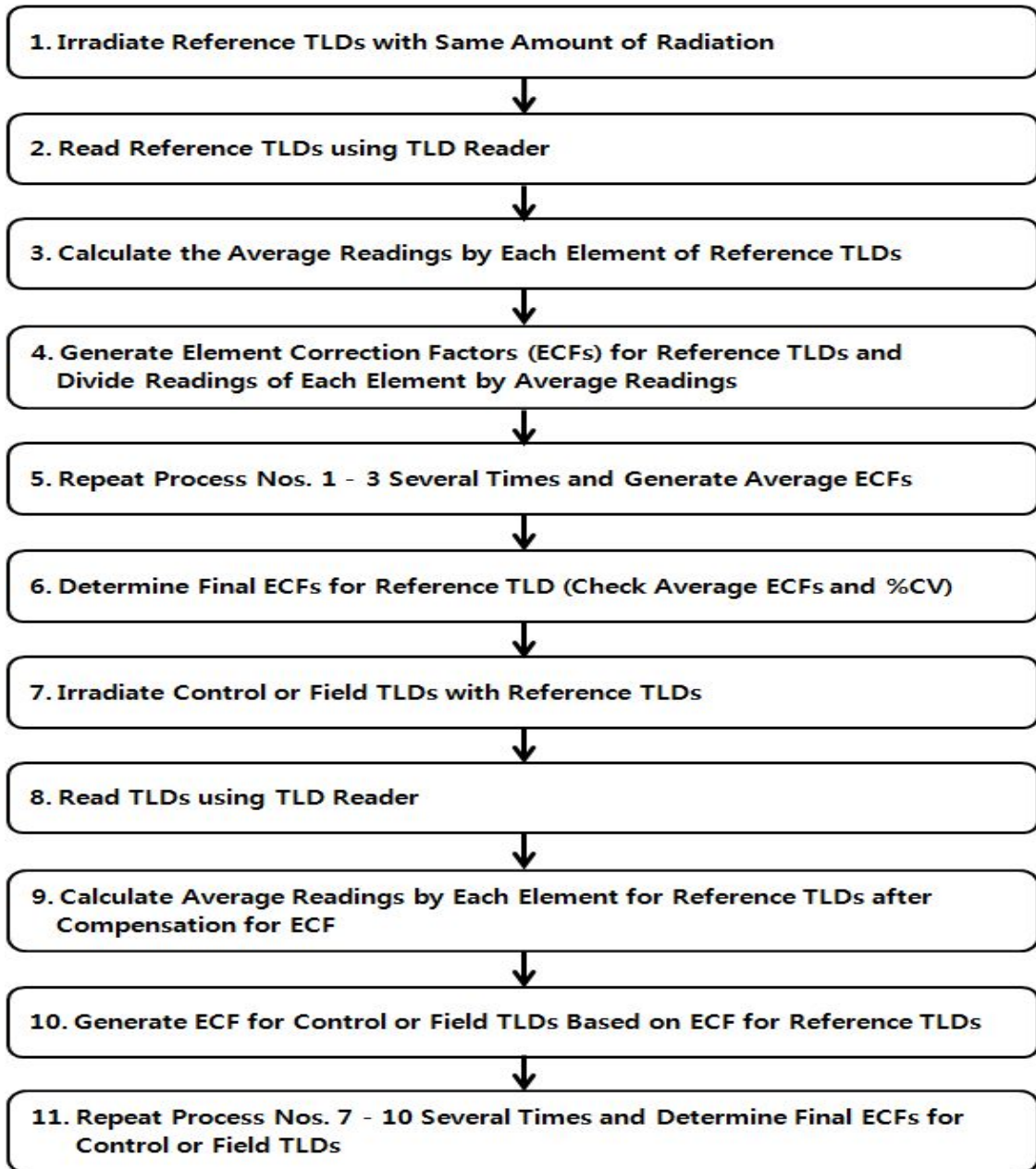


그림 6.4 Process of ECF generation

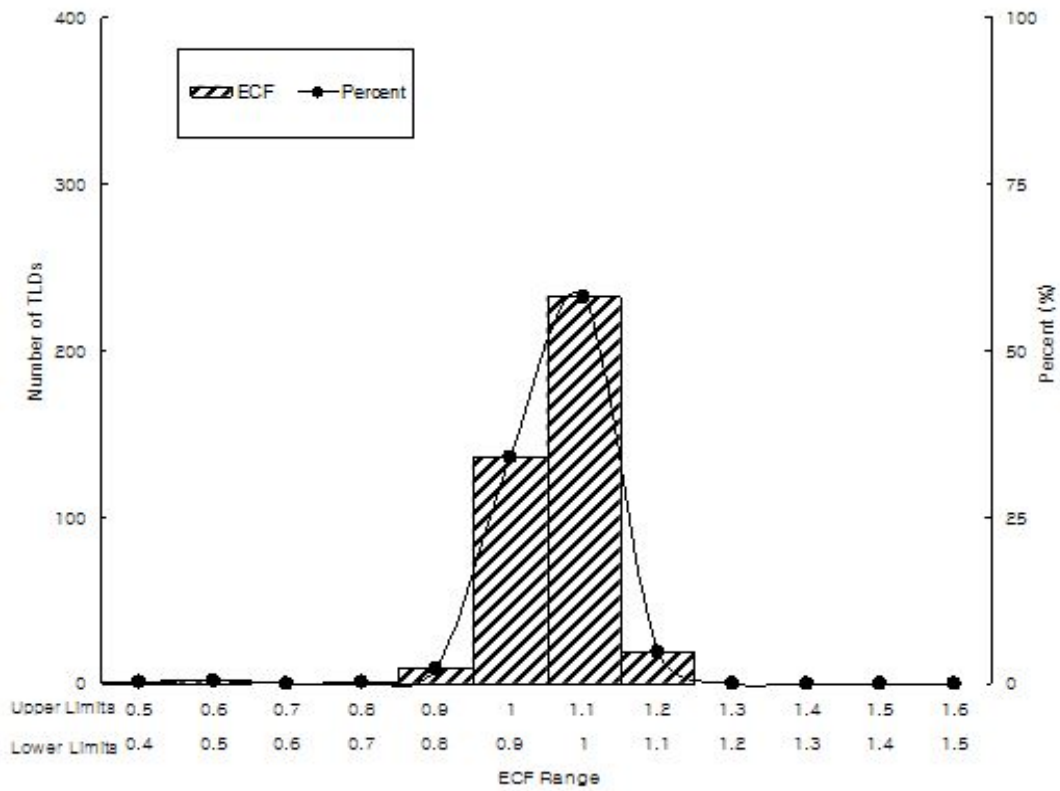


그림 6.5 Distribution of ECF generation for Harshaw EXTRAD dosimeters

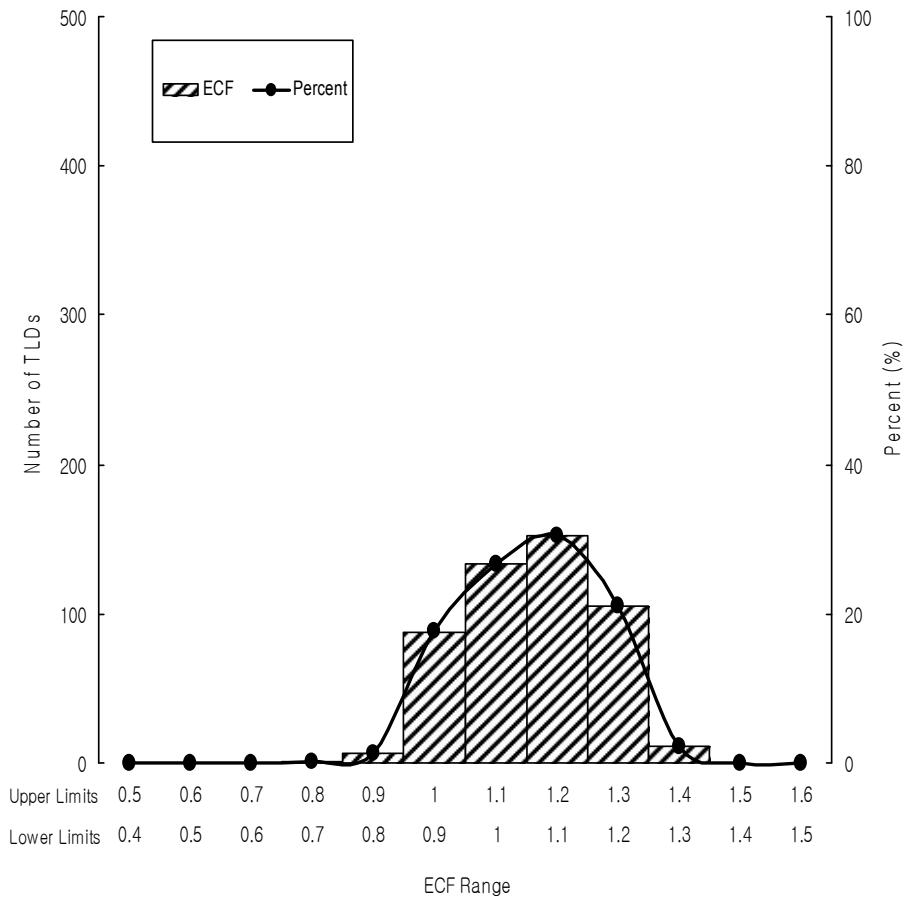
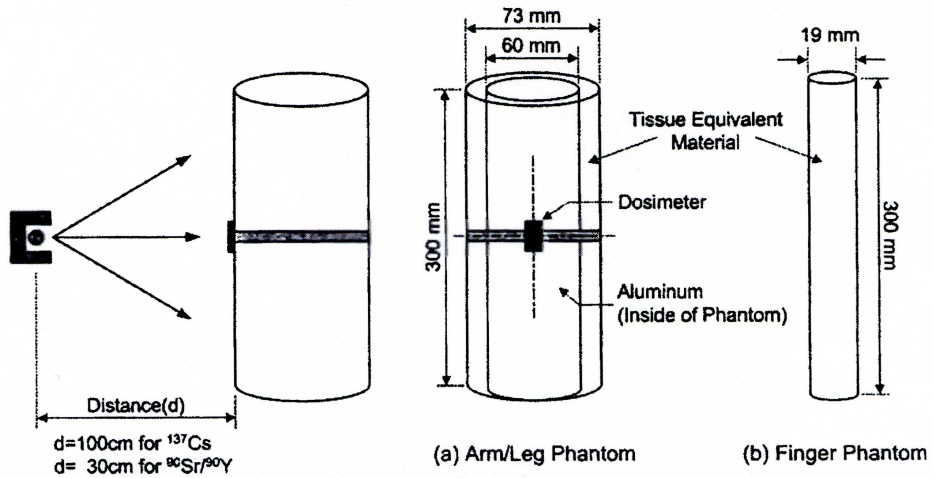


그림 6.6 Distribution of ECFs generated for Panasonic UD-807 dosimeters



(a) schematic diagram of phantoms



(b) finger phantom



(c) wrist phantom

그림 6.7 Finger and wrist phantom geometry

표 6.2 Comparison of DCF results for extremity dosimeters between Harshaw EXTRAD and Panasonic UD-807

Beam code	Harshaw		Panasonic	
	EXTRAD	Manufacturer <sup>a</sup>	UD-807	Manufacturer
High-energy photon				
<sup>137</sup> Cs	0.94	1.0	0.89	0.94
X-ray				
20 keV	0.92	–	0.58	0.45
35 keV	1.13	–	0.65	0.72 <sup>b</sup>
53 keV	1.21	–	0.64	0.77 <sup>c</sup>
73 keV	1.09	–	0.68	0.84 <sup>d</sup>
Beta-ray				
<sup>90</sup> Sr/ <sup>90</sup> Y	1.14	–	1.04	1.19

<sup>a</sup>The manufacturer provides the DCF for only high-energy photon (Cesium-137).

<sup>b,c,d</sup>The Manufacturer uses slightly different radiation fields for DCF calculation of dosimeters from those of ANSI 13.32-1995 (b: 30 keV, c: 50 keV, d: 70 keV).

### 제3절 말단선량계 지급조건 결정

국내원전에서는 방사선작업종사자의 피폭방사선량 평가를 위한 개인선량계는 방사선 관리구역에 출입하는 경우 모든 원전종사자에게 지급된다. 한편 높은 선량을 지역, 즉, 방사선량을 1 mSv/hr 인 조건이나 또는 신체 부위별로 방사선량률의 차이가 30 % 이상인 경우에 대해 단일작업에서 선량한도의 10 % 수준인 2 mSv 이상 피폭을 받을 것으로 예상되는 자를 대상으로 복수선량계를 지급하고 있다[10,20].

한편 국내원전에서는 종사자의 전신선량 평가 외에 손과 발에 대한 등가선량 측정을 위해 Panasonic과 Harshaw 등 2종류의 말단선량계를 이용하고 있다. 이러한 말단선량계를 이용함에 있어 말단선량계 지급조건이 2009년 이전에는 통일된 기준이 정립되지 수립되어 있지 않았다[50]. 즉, 통상 손과 발의 등가선량이 유효선량보다 높거나, 전신선량의 2배 이상 피폭이 예상될 때, 1회 5 mSv 이상 피폭을 받을 것으로 예상될 때 또는 단일작업으로 50 mSv 이상 피폭이 예상될 때 등 일관성이 부족하게 말단선량계를 지급하였다[50].

따라서 본 논문에서는 이러한 국내외 원전의 말단선량계 지급절차와 기술기준에서 규정된 지급조건에 대해 다양한 검토와 의견 수렴과정을 거쳤다. 특히 주선량계 외에 추가적으로 지급되는 복수선량계의 지급조건인 선량한도의 10 % 이상 피폭이 예상될 때 지급조건 등도 병행하여 검토하였다. 최종적으로 방사선작업으로 말단에 대한 등가선량 한도의 10 % 이상 피폭을 받을 것으로 예상될 때 말단선량계를 지급하는 것으로 결정하여 현장시험을 수행하였다[17-19,50]. 한편 한국원자력안전기술원에서는 본 연구결과를 기초로 최근에 제정된 개인선량계 지침에서 말단선량계는 1회 25 mSv 이상 피폭될 것으로 예상되거나 또는 단일작업으로 50 mSv 이상 피폭될 것으로 예상될 때 지급하는 것으로 결정되었다[17-20,50]. 이러한 점을 고려해볼 때 선량한도의 10 % 수준의 피폭이 예상될 때 말단선량계를 지급하는 것은 적절한 것으로 판단되었다. 이러한 점은 규제기관과 협의를 거쳐 최종적으로 말단선량한도의 5 %를 초과할 것으로 예상될 때 말단선량계를 지급하는 것으로 결정하였다[18-20].

## 제4절 고평폭 접촉작업의 방사선장 특성

국내 원전종사자의 방사선피폭은 80 % 이상이 계획예방정비기간 중에 수행되는 방사선작업으로부터 발생하고 있다. 대표적인 고평폭 방사선작업으로는 증기발생기 수실 내에서 이루어지는 노즐담 설치와 제거작업, 원자로 냉각재펌프 보수작업, 원자로헤드 보수 및 검사작업 등을 들 수 있다. 특히 증기발생기 보수작업과정에서는 짧은 시간 작업에도 불구하고 높은 피폭을 받고 있다. 이들 작업에서 방사선량률에 기여하는 방사성핵종으로는 대부분 고에너지 투과성 핵종인  $^{58}\text{Co}$ 과  $^{60}\text{Co}$  핵종에 의해 발생하는 것으로 알려지고 있다[1,10].

한편 증기발생기 수실 내부에서의 방사선량률은 대부분 위쪽에 있는 U-tube로부터 발생하고 있다. 따라서 방사선장 Geometry가 위에서 아래로 형성되고 있다. 한편 원전의 운전이력이나 보수상태에 따라 방사선량률은 차이를 보이나, 대략 수십 mSv/hr에서 수백 mSv/hr 내외의 비균질한 방사선장이 형성되고 있다[11,50]. 이에 따라 증기발생기 수실 내에서는 방사선작업종사자의 위치에 따라 방사선량률이 신체 각 부분 간에(예, 머리, 가슴, 등 등) 불균일하게 피폭이 나타나고 있다. 증기발생기 수실에서의 작업 개요를 그림 4.2, 5.1 및 6.8에 나타내었다.

2004년과 2005년 한빛원전 4호기 제7차 계획예방정비기간 동안 증기발생기 수실(Steam generator water chamber) 방사선작업을 수행한 방사선작업종사자를 대상으로 최적의 복수선량계 알고리즘 선정에 위한 적용성 시험을 실시하였다[10]. 이 시험에서 방사선작업종사자는 가슴, 머리와 등에 TLD 3개를 동시에 패용하고 증기발생기 수실내에서 노즐담 설치와 제거작업 등을 수행하였다. 이 적용시험에서는 Panasonic TLD UD-802를 패용하였다. 한편 이들 신체 3개 부위에 패용한 TLD 판독 결과에 근거하여 NCRP(55/50) 알고리즘을 복수선량계 최적 알고리즘으로 선정하였다[10]. 이 복수선량계 적용성을 판단하기 위한 현장시험 결과에서는 심부선량을 기준으로 알고리즘을 선정하였다. 그렇지만 증기발생기 수실내 방사성물질과 접촉하는 경우를 고려하여 손이 받는 등가선량을 평가하기 위해 TLD 소자반응도에 근거하여 표층선량을 별도로 산출하였다. 이 결과 중의 일부를 표 6.3에 나타내었다[17-19]. 이 경우 고에너지



감마선이 주 피폭원일 경우 말단선량평가는 단순하나, 저에너지 감마선이 주 피폭원일 경우 보다 심도 깊은 평가가 필요할 것으로 판단되었다.

한편 복수선량계 알고리즘 적용시험 TLD 판독결과를 이용하여 피폭방사선장을 해석하였다. 먼저 증기발생기 수실 작업에 참여한 방사선작업종사자의 심부선량과 표층선량이 동일하게 나타나, 방사선선에너지는 고에너지 투과성 방사선(High energy penetrating radiation)으로 판단되었다. 또한 Panasonic TLD 소자 반응도와 피폭방사선량 평가 알고리즘을 근거로 종사자에게 입사된 방사선장을 유추하였다. 그 결과 4개 소자의 반응도 비율이 동일하게 나타나 고에너지 광자에 의한 피폭으로 해석되었다[10,18,19]. 이 경우 Panasonic TLD 알고리즘 중에서 고에너지 광자에 해당되는 Branch를 그림 6.9, Panasonic TLD 구조를 그림 6.10에 나타내었다. 이러한 결과는 Harshaw TLD를 사용한 원전의 경우에도 동일하게 나타났다. 따라서 이러한 점을 종합적으로 고려해볼 때 증기발생기 수실 내에서 고피폭 접촉작업의 입사방사선장은  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ 과 같은 고에너지 광자(High energy photons)에 의한 피폭으로 평가되었다[10,17-19,51].

이외에 원전종사자의 주요 방사선 피폭원으로 고에너지 감마 방사선장이라는 내용은 국내 원전의 주요 피폭지점에서 방사선장 측정시험을 통해 확인하였다[28]. 국내원전의 계획예방정비기간 휴대용 감마분석용 반도체검출장비(Portable HPGe Detector)를 이용하여 원자로건물과 보조건물 주요지역에 대한 방사선장 측정이 이루어졌는데, 산란 등에 의해 감마 방사선의 에너지가 일부 감소되기는 하나 원자로건물 내에서는 437~784 keV, 보조건물 내에서는 280~760 keV로서 고에너지 광자로 나타났다. 또한 국내원전의 증기발생기 내 표면오염과 냉각재 Crud에 대한 시료채집과 감마 핵종 분석을 통해  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ 이 전체방사능의 90% 이상을 차지하는 것으로 확인되었다[10,51]. 국내원전에서 감마방사선장 측정시험, 증기발생기와 냉각재의 감마핵종 분석시험, 복수선량계 현장시험 등의 일치된 결과를 통해 고에너지 감마선이 주요 피폭원임을 재확인할 수 있었다. 한편 미국전력연구소(EPRI)에서 발간된 보고서나 연구 결과에서도 계획예방정비기간 중에 일어나는 방사선피폭은 고에너지 감마선원에 의한 피폭이 주류임을 확인할 수 있었다[10,51].



표 6.3 TLD(Panasonic UD-802) readouts of radiation workers for the maintenance of steam generator nozzle dam at Hanbit NPPs in 2004

Workers	Element 1 (mR*)	Element 2 (mR*)	Element 3 (mR*)	Element 4 (mR*)	Deep dose(mSv)	Shallow dose(mSv)	Wearing position
AY	2.80	2.84	2.69	2.64	2.73	2.73	Head
	1.77	1.72	1.88	1.86	1.80	1.80	Chest
	2.25	2.16	2.34	2.26	2.25	2.25	Back
BY	2.07	2.02	1.98	1.95	2.00	2.00	Head
	1.75	1.66	1.82	1.81	1.75	1.75	Chest
	2.09	1.83	2.02	2.08	2.00	2.00	Back
CY	1.80	1.75	1.89	1.86	1.82	1.82	Head
	1.49	1.45	1.60	1.57	1.52	1.52	Chest
	1.81	1.84	1.91	1.94	1.86	1.86	Back
DY	2.23	2.25	2.03	2.28	2.19	2.19	Head
	1.82	1.76	1.87	1.82	1.81	1.81	Chest
	2.03	2.08	2.09	2.21	2.02	2.02	Back
EY	1.99	2.08	1.92	2.13	2.02	2.02	Head
	1.48	1.28	1.65	1.61	1.50	1.50	Chest
	1.91	1.93	2.06	2.01	1.97	1.97	Back
FY	1.24	1.18	1.20	1.31	1.23	1.23	Head
	0.90	0.81	1.02	0.97	0.92	0.92	Chest
	0.94	0.96	1.04	1.06	1.00	1.00	Back
GY	0.74	0.70	0.79	0.85	0.76	0.76	Head
	0.57	0.44	0.59	0.58	0.54	0.54	Chest
	0.58	0.60	0.72	0.71	0.65	0.65	Back
HY	1.94	1.99	1.84	1.97	1.93	1.93	Head
	1.68	1.53	1.80	1.86	1.71	1.71	Chest
	2.17	1.96	2.01	2.04	2.04	2.04	Back
IY	2.63	2.29	2.35	2.41	2.41	2.41	Head
	2.01	1.86	1.93	1.88	1.91	1.91	Chest
	2.17	2.05	2.25	2.08	2.13	2.13	Back
JY	2.71	2.67	2.48	2.58	2.60	2.60	Head
	2.22	1.89	2.15	2.12	2.09	2.09	Chest
	2.82	2.66	2.65	2.76	2.71	2.71	Back
KY	4.71	4.20	3.85	4.30	4.25	4.25	Head
	3.01	2.82	3.08	2.97	2.96	2.96	Chest
	3.75	3.66	3.61	3.77	3.68	3.68	Back
LY	0.75	0.76	0.66	0.77	0.73	0.73	Head
	0.46	0.45	0.54	0.51	0.48	0.48	Chest
	0.68	0.62	0.65	0.67	0.65	0.65	Back
MY	2.36	2.22	2.16	2.47	2.29	2.29	Head
	1.56	1.48	1.69	1.60	1.57	1.57	Chest
	2.19	1.94	2.12	2.04	2.07	2.07	Back

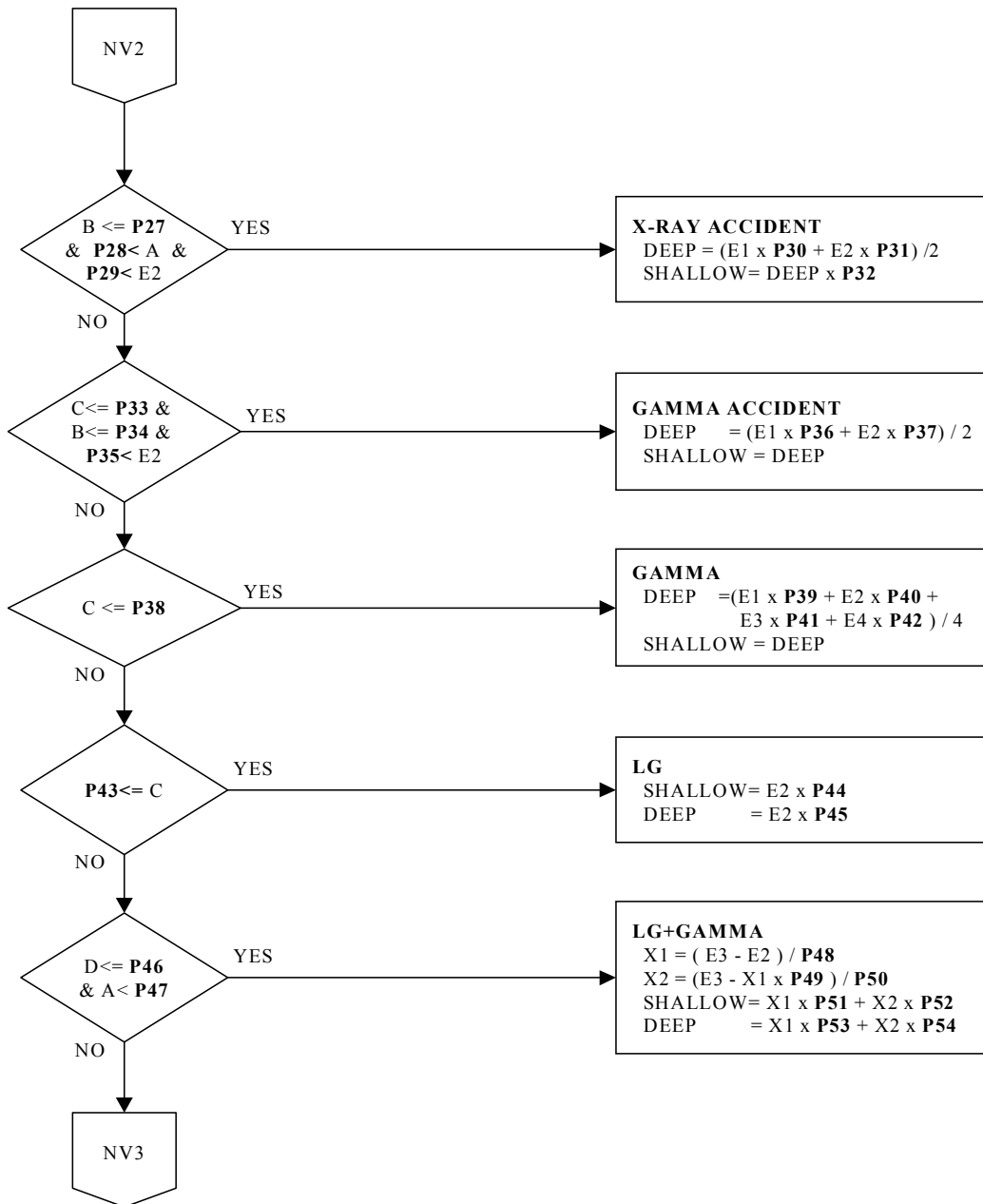


그림 6.9 Dose calculation algorithm for Panasonic TLD (Gamma branch)

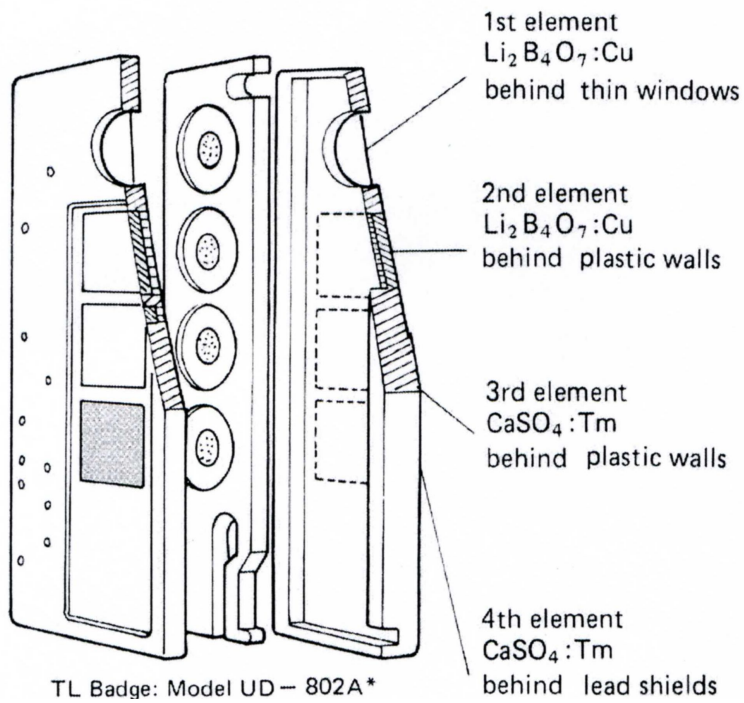


그림 6.10 Panasonic TLD Structure

## 제5절 말단선량 평가 현장시험과 결과

2009년 계획예방정비기간 한울원전 4호기의 증기발생기 정비작업에 참여할 예정인 작업종사자에 대해 한울원전 제 2발전소 방사선안전팀의 협조를 얻어 고피폭 접촉작업(High exposure and contact work)에서 입사 방사선장의 특성과 피폭특성을 판단하기 위한 현장시험(Field test)을 실시하였다[17-19]. 이 현장시험에서는 원전종사자 피폭방사선량 평가용으로 보유하고 있는 Harshaw TLD를 사용하였다. 이들 작업이 불균일 고피폭 방사선조건이므로 방사선작업종사자의 가슴과 등에 8806 전신선량 평가용 TLD를 방사선작업관리 절차에 따라 패용하였다. 추가로 손목에는 가슴과 등에 패용하였던 것과 동일한 종류의 TLD를 패용하였고, 손가락에는 Extremity dosimeter 종류인 TLD-100을 패용하였다. 따라서 방사선작업종사자는 총 4개의 TLD를 가슴, 등, 손목과 손가락에 패용하였으며, 추가로 2개의 ADR(Auto Dosimetric Reader)를 패용하고 방사선작업을 수행하였다. 그림 6.11에 가슴, 등 및 손목에 패용한 전신용 Harshaw TLD 구조를 나타내었다. 한편, 손가락에 패용한 Harshaw TLD(ETLD)의 모양은 그림 6.1과 6.2에 나타내었다[17-19].

가슴과 등에 패용한 TLD는 고피폭 비균질한 방사선조건에서 일상적으로 패용하는 복수선량계를 이용한 피폭방사선량 평가 절차에 따른 것이다. 한편 손목에 패용한 TLD는 손가락에 입사하는 방사선장의 특성분석(Unfolding)을 목적으로 방사성물질과 접촉하는 손가락에 가장 가까운 손목에 패용하였다. 이 경우 손목에는 가슴과 등에 패용한 TLD와 동일한 Harshaw 8806 TLD를 패용하였다. 한편 손가락에 패용한 ETLD는 실질적인 말단선량 현황을 파악하기 위함이었다. ETLD는 형광소자가 1개만 설치되어 있으며, 손가락이 받는 등가선량을 측정하기 위함이었다. 손목에 패용한 TLD의 판독 결과를 표 6.4에 나타내었다[17-19].

한편 고피폭 접촉작업에 대한 입사방사선장을 확인하고 말단선량을 평가하기 위한 현장시험을 2009년 중수로원전인 월성 1호기의 압력관교체(Pressure tube replacement) 작업에 참여한 방사선작업종사자를 대상으로 추가로 실시하였다. 현장시험 방법은 한울 4호기에서 적용하였던 말단선량평가 현장시험과 동일하게 진행되었다. Panasonic

UD-802 선량계를 가슴, 등, 손목에 패용하였으며, UD-807 말단선량계를 손가락에 패용하였다. 이 현장시험 결과 중에서 손목에 착용한 TLD의 소자별 판독값과 심부선량과 표층선량을 표 6.5에 나타내었다[18]. 그림 6.10에 가슴, 등 및 손목에 패용한 Panasonic TLD 구조를 나타내었다.

이들 한울과 월성원전 방사선작업종사자의 손목에 패용한 TLD 판독값을 분석한 결과 4개 소자별 반응도가 동일하게 나타났다. 또한 이들 소자 반응도에 근거하여 TLD 판독 알고리즘을 기준으로 계산되는 심부선량과 표층선량은 동일하게 나타났으며, 입사방사선장은 고에너지 광자로 평가되었다. 이 결과는 한빛원전에서 실시한 복수선량계 적용시험 결과와 동일하였다. 따라서 원전 계획예방정비기간 고피폭 접촉작업에서 종사자의 피폭방사선량은 입사방사선장이 고에너지 광자에 의해 발생하는 것으로 동일하게 판단되었다[18].

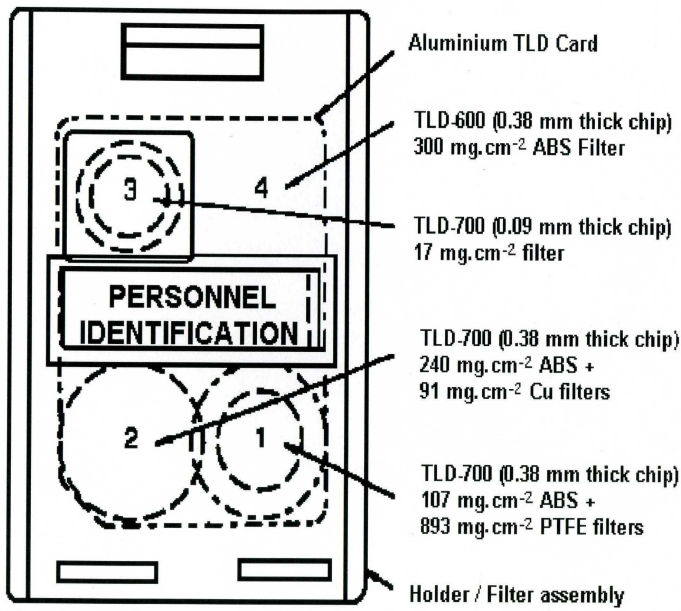


그림 6.11 Harshaw TLD Structure



표 6.4 TLD(Harshaw 8806) readouts of radiation workers who wear TLD on wrist for the maintenance of steam generator at Hanul NPPs in 2009

Workers	Element 1 (gU)	Element 2 (gU)	Element 3 (gU)	Element 4 (gU)	Deep dose (mSv)	Shallow dose (mSv)
NU	253.2	243.6	256.5	259.0	2.17	2.17
OU	284.1	275.6	277.0	278.8	2.46	2.46
PU	146.6	137.3	148.6	150.6	1.21	1.21
QU	119.9	113.8	119.5	121.2	1.00	1.00
RU	313.5	303.8	308.6	320.2	2.72	2.72
SU	76.6	71.8	79.7	82.3	0.69	0.69

표 6.5 TLD(Panasonic UD-802) Readouts of radiation workers who wear TLD on wrist for the pressure tube replacement at Wolsong NPPs in 2009

Workers	Element 1 (mSv*)	Element 2 (mSv*)	Element 3 (mSv*)	Element 4 (mSv*)	Deep dose (mSv)	Shallow dose (mSv)
TW	0.96	0.92	0.82	0.84	0.86	0.86
UW	0.95	0.87	0.86	0.89	0.87	0.87
VW	0.55	0.56	0.47	0.46	0.49	0.49
XW	0.51	0.48	0.44	0.44	0.45	0.45
YW	0.83	0.73	0.73	0.72	0.73	0.73
ZW	0.74	0.88	0.65	0.70	0.72	0.72

## 제7장 결론 및 제안

유효선량은, ICRP 60에서 도입된 단위로서, 방사선의 가중치와 신체 각 조직의 가중치를 고려하여 전신이 받는 피폭방사선량을 말한다. 이 값은 방사선방호 실무에서는 인체 10 mm 깊이에서 개인선량당량(Personal dose equivalent, Hp(10))을 이용하여 평가하고 있다. 원전에서 Hp(10)은 TLD를 이용하여 측정·평가하고 있는데, 이를 정확히 측정·평가하기 위해서는 신체에 피폭되는 방사선의 종류와 에너지, 그리고 신체의 각 장기별 피폭 방사선량을 정확히 알고 있어야 한다. 이 논문은 원전의 계획예방정비기간 중에 수행하는 고피폭 예상 작업에서 종사자의 피폭방사선량을 정확하게 평가하는데 필요한 복수선량계 알고리즘에 대한 개선 결과와 방사성물질과 접촉 작업에서 말단선량계를 이용한 피폭방사선량 평가를 개선한 내용을 기술하고 있다.

국내 원전의 계획예방정비기간 중에 행해지는 증기발생기 수실, 원자로 냉각재 펌프 보수 및 가압기 관련 작업 등은 매우 높은 방사선량률을 나타내는 지역으로 짧은 시간 동안의 작업에도 불구하고 높은 방사선량을 피폭 받을 가능성이 있다. 이런 경우에 사용되는 복수선량계 절차에 대해 검토한 결과 원전의 복수선량계 지급조건의 불일치, 과대 또는 과소평가되는 여러 문제점을 내포하고 있었다. 특히, 복수선량계의 패용위치에 대해 과거에는 증기발생기 수실에서 방사선원이 위쪽에 있는 유티브(U-tube)임을 고려하여 2개의 TLD를 머리와 가슴에 패용하였다. 또한 지급된 복수선량계 TLD 판독값 중에서 최대값을 유효선량으로 평가함으로써, 피폭방사선량이 약 30 % 정도 과대평가되고 있는 것으로 나타났다. 이러한 문제점을 체계적으로 개선하기 위한 다양한 검토가 이루어졌고, 원전에서 보수작업자의 협조를 통해 현장시험을 실시하였다.

국내 원전의 계획예방정비기간 종사자의 피폭은 주로 비균질한 고평사선량률 작업에서 발생하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 이들 작업의 방사선장의 특성을 조사하였고, 휴대용 핵종분석 장비 등을 이용한 실측 결과 등도 조사하였다. 특히 심부선량을 평가할 목적으로 제작된 TLD의 설계·제작 요건, 에너지를 구분하여 피폭방사선량을 계산하는 TLD 선량평가 소프트웨어 구성내역과 고피폭 작업자의 TLD 판독 값을 분석하였다. 그 결과 작업자에게 입사되는 방사선장은 고에너지 광자(High energy photon)로 확인되었다. 한

편 ICRP 60에서 선량한도의 감소를 고려하여 고평폭 예상 작업에 지급하는 복수선량계를 방사선량률이 1 mSv/hr를 초과하거나, 또는 신체 특정부위의 예상 피폭방사선량이 가슴 부위에 비하여 30 % 이상 차이가 나면서, 단일 작업에서 2 mSv 이상 피폭 방사선량을 받을 것으로 예상되는 작업자를 대상으로 지급하도록 확정하였다. 이런 결과는 원전의 피폭방사선량 평가 절차와 KINS 지침(13.3 개인선량계)에 반영되었다.

국내원전의 복수선량계 문제점을 개선하기 위한 복수선량계 알고리즘 적용성 시험을 실시하였다. 이 시험에서 계획예방정비기간동안 고평폭이 예상되는 방사선작업을 대상으로 작업종사자에게 3개의 TLD를 동시에 지급하였고, 이를 가슴, 머리, 등에 동시에 패용하고 판독하였다. 이러한 현장시험의 TLD 판독 결과를 바탕으로 복수선량계 알고리즘의 선량 분포, 수치해석과 비교, 복수선량계 알고리즘에 대한 기술적인 특성, 방사선원 위치에 따른 영향, 저에너지 방사선의 저평가 가능성과 방사선작업에서 착용 편리성 등을 종합적으로 고려하여 미국방사선방호위원회(NCRP)에서 권고한 NCRP(55/50) 알고리즘을 최적의 복수선량계 알고리즘으로 선정하였다. 특히 이 알고리즘은 TLD를 가슴과 등에 패용하는 방식으로, 기존의 가슴과 머리에 패용하는 경우에 비해, 피폭방사선량을 저평가 또는 과대평가하지 않는 것으로 나타났다. 특히 복수선량계 적용성 시험에 참여한 종사자의 인터뷰에서 가슴과 머리 위치 패용보다는 가슴과 등 부위에 패용을 더 선호하는 것으로 확인되었다. 이러한 점은 보수작업에서 작업자의 인간공학적 측면을 고려한 것이며, 작업의 품질에도 좋은 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

상기와 같이 표준으로 선정된 NCRP (55/50) 알고리즘과 이에 대한 기술적 배경을 근거로 국내원전의 복수선량계 피폭방사선량 평가 절차를 통일되게 개정하였고, 2006년부터 원전 방사선피폭평가의 실무에서 적용하고 있다. 이러한 개선에 따라 원전 비균질한 방사선작업 과정에서 종사자의 피폭방사선량을 ICRP 60의 유효선량 체계에 맞추어 신뢰성 있게 평가할 수 있는 토대를 구축하였다고 판단되었다. 그런데 2007년 국제방사선방호위원회는 유효선량의 개념을 바꾸어 ICRP 103으로 발간함에 따라, 현재 국내원전에서 적용중인 NCRP (55/50) 알고리즘에 대해, ICRP 103 방사선방호 체계 하에서 계속 적용할 수 있는가를 검토하였다. 그 결과 NCRP(55/50) 알고리즘은 유효선량당량과 유효선량을 동일한 평가방식과 인자를 이용하여 큰 차이 없이 피폭방사선량을 평가함을 확인하였

다. 또한 ICRP 103에 기반을 두고 수치해석적 방법에 의해 개발된 Kim 알고리즘 (2011) 등과도 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 따라서 NCRP (55/50) 알고리즘은 ICRP 103 방사선방호 체계 하에서도 계속 적용이 가능한 것으로 판단되었다.

한편, 원전 계획예방정비기간 증기발생기 수실작업, 가압기 전열관 교체 또는 압력관 피더 제거작업 지역 등은 수십에서 수백 mSv/hr 이상으로 매우 높은 방사선량률을 보이는 지역으로, 짧은 시간 동안 작업으로 종사자는 높은 피폭을 받을 가능성이 있다. 특히, 방사성물질과 접촉 작업을 하는 손 부위는 고피폭이 예상되고 있어, 원전 종사자의 말단선량 평가의 필요성이 대두되었다. 그렇지만 원전에서는 말단선량계를 구비하고 있으나, 방사선작업에서 실질적인 지급과 판독, 지급절차와 지급조건 그리고 말단선량(등가선량)의 관리방법은 표준화되어 있지 않았다. 이러한 배경 하에서 국내원전의 계획예방정비기간 고피폭 접촉작업에서 작업자의 말단선량을 측정하기 위한 현장시험을 실시하였다. 여기에 참여한 종사자는 가슴과 등 부위에 복수선량계를 패용한 것 이외에 손목에 동일한 TLD를 추가로 패용하였고, 손가락 부위에는 말단선량계를 패용하였다. 그 결과에 대한 분석을 통해 말단선량을 평가하는데 필요한 소자보정인자, 베타선과 감마선에 대한 반응도 및 지급조건 등에 대한 핵심 자료를 생산하였다.

말단선량계 현장시험에서는 먼저 원전이 보유한 Panasonic과 Harshaw 두 종류 말단선량계의 소자보정(Element correction) 시험이 이루어졌다. 소자보정시험은 Whole-body TLD와 동일한 소자보정 시험방법이 적용되었고, 다양한 통계분석이 이루어졌다. 또한 소자보정시험 후에는 자체 보유 선원을 이용한 방사선 조사 및 판독과정을 거쳐 한국원자력연구원(KAERI) 등이 보유한 표준 방사선원을 이용한 방사선원을 이용한 방사선조사와 분석을 통한 말단선량계의 반응도를 도출하였다. KAERI 저에너지 엑스선, Cs-137 등의 감마선과 베타선원을 이용한 반응도 시험 결과 제작자가 제시한 반응도와 큰 차이 없이 일치하는 것으로 확인되었다. 이러한 반응도 시험 결과를 원전절차에 반영함으로써 말단선량을 신뢰성 있게 평가할 수 있는 토대를 구축하였다.

말단선량계의 지급조건에 대해 많은 검토와 조사 분석이 이루어졌다. 국내외 규제나 전문기관의 말단선량 평가·관리지침, 국내외 원전의 말단선량계 관리절차, INPOL나

WANO의 지급조건과 피폭방사선량 관리지침 등도 조사되었고, 국내원전의 말단선량 평가 현장시험 결과를 토대로 등가선량 한도의 10 %를 지급조건으로 제시되었다. 이 결과에 대해 규제기관과 논의를 거쳐 일회 피폭에서 선량한도의 5 %인 25 mSv를 초과하거나, 다수 작업에서 선량한도의 10 %인 50 mSv를 초과할 경우 말단선량계를 지급하기로 결정하였다. 이러한 내용은 KINS 규제지침의 제정에 반영되었다.

한편 고피폭 접촉 작업자의 입사 방사선장을 두 가지 측면에서 조사하였다. 먼저 복수선량계 현장시험 중에서 증기발생기 수실 보수작업에 참여한 작업자의 TLD 판독 값을 정밀 분석한 결과 심부선량과 표층선량이 동일하게 나타났다. 이는 이들 작업에서 작업자에게 영향을 주는 피폭방사선장은 투과성이 큰 고에너지 광자(High energy photon)로 판단되었다. 또한 고피폭예상 접촉작업을 대상으로 실시한 말단선량계 현장시험 결과 중에 손가락에 가장 가까운 작업종사자의 손목에 패용한 whole-body TLD 판독 값을 정밀 분석하였다. 그 결과 심부선량과 표층선량이 동일하게 나타났고, 이에 따른 입사방사선은 고에너지 광자로 재확인되었다.

원전 계획예방정비기간 말단선량계 현장시험에 참여한 작업참여자의 말단선량은 예상보다 높지 않게 나타났다. 손가락 등가선량은 손목 등가선량의 1.5배 범위와 심부선량의 2배 범위 내에 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 고에너지 광자에 의한 피폭에 따른 것으로, 원전에서는 베타선 등에 의한 말단선량(등가선량)의 위험도가 크지 않음을 확인하였다. 따라서 심부선량 만으로 충분히 방사선안전관리를 신뢰성 있게 수행할 수 있는 것으로 판단되었다.

이러한 복수선량계 지급조건과 피폭방사선량평가 알고리즘에 대한 연구결과는 국내 원전의 피폭방사선량 평가 절차에 반영됨은 물론 해외 SCI 저널에 게재되었고, 방사선 방호 관련 규제기준의 제정에도 반영되었다. 또한 말단선량계를 이용한 피폭방사선량 평가를 위한 TLD 소자보정, 방사선장 특성분석과 현장시험 결과 등도 국내원전의 절차에 반영되었고, 해외 SCI 저널에 게재됨은 물론 방사선방호 관련 규제기준의 제정에 반영되었다. 이러한 점은 국내 원전의 피폭방사선량평가 기술적 위상을 높이는 데 크게 기여하였다. 그렇지만 이러한 피폭방사선량 평가에 관한 연구는 지속적으로 추진하여, 원전종사자와 국민의 신뢰성을 제고하는데 계속되기를 희망하고 있다.

## 참고문헌

1. Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd. 2013 Annual Report for the Radiation Safety Management in Nuclear Power Plants, (2014).
2. 산업통상자원부/한국수력원자력(주), 2013 원자력발전백서, 2013
3. International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological protection. ICRP 60. Pergamon Press, (1991).
4. International Atomic Energy Agency (IAEA). International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115, IAEA, Vienna, (1996).
5. 조건우. IAEA BSS 개정현황 및 ICRP 103 국내제도화 방향, 제14차 피폭방사선량 평가 워크샵, 문경 STX 리조트, 2010.4.21.
6. 교육과학기술부 원자력연구기술개발사업, 방사선 리스크 저감 선진기술개발(대과제)/방사선방호 최적화 연구(세부과제), 한국원자력안전기술원, 2007.
7. International Commission on Radiological Protection. 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Pergamon Press, (2007).
8. International Commission on Radiological Protection. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External radiation. ICRP Publication 74. Pergamon Press, Oxford, UK, 1997.
9. 교육과학기술부. 고시 2008-4호: 판독업무 등록기준 및 검사에 관한 규정, 2008.
10. Kim, H. G. and Kong, T. Y. Selection of the Most Appropriate Two-dosimeter Algorithm for Estimating Effective Dose Equivalent During Maintenance Periods in Korean NPPs. Radiation Protection Dosimetry 140(2), 171-181 (2010).
11. 한수원(주) 한빛 제2발전소. 피폭 방사선량 평가 및 관리절차서. 방사-201, 2004.
12. Kim, H. G. and Kong, T. Y. Operational Experience of a Two-dosimeter Algorithm for Better Estimation of Effective Dose at Korean NPPs. Journal of Radiation Protection. 34(4), 165-169 (2009).

13. Hee Geun Kim, Tae Young Kong, Woo Tae Jeong and Seok Tae Kim. Radiation Fields and Dose Assessment in Korean Nuclear Power Plants. Radiation Protection Dosimetry 146 (1-3), 136-139 (2011).
14. 김희근, 공태영. ICRP 103 방사선방호 체계하에서 유효선량 평가를 위한 Two-Dosimeter 알고리즘의 적용방안, Journal of Radiation Protection, 36(3), 133-138 (2011).
15. Institute of Nuclear Power Operation. Guidelines for radiological protection at nuclear power stations. INPO 91-014 Rev. 1 (INPO) (1995).
16. World Association of Nuclear Operations (WANO). Guidelines for Radiological Protection at Nuclear Power Plants. WANO GL 2004-01 (WANO) (2004).
17. Kong, T. Y. and Kim, H. G. Application of Element Correction and Personal Dose Equivalent Response to Extremity Dosimeters Used at Korean NPPs. Journal of Nuclear Science and Technology. 49(3), 352-359 (2012).
18. Kim, H. G. and Kong, T. Y. An Analysis of the Radiation Field Characteristics for Extremity Dose Assessment during Maintenance Periods at Korean NPPs. Radiation Protection Dosimetry. 152(4), 468-471 (2012).
19. Kim, H. G. and Kong, T. Y. A Field Test on the Extremity Dose Assessment During Outages at Korean Nuclear Power Plants, Radiation Protection Dosimetry. 154(4), 522-525 (2012).
20. 한국원자력안전기술원. KINS 안전규제 기준 및 지침(안): 13.3 개인선량계, 2009.
21. Jong Rak Choi, Hee Geun Kim, Tae Young Kong and Jung Kwon Son, Dosimetry Experiences and lessons Learned for Radiation Dose assessment in Korean Nuclear Power Plants. Radiation Protection Dosimetry. 155(2), 245-249 (2013).
22. Lee, S. K. Analysis on Nuclear Power Plant exposure and the Mid-term Plan for Reduction of Radiation Exposure , Nuclear Power Plant Radiation Safety Management Workshop, (2008).
23. 한국원자력안전기술원. 원자력법령집. 2013.
24. 대한방사선방어학회(KARP), 2007 국제방사선방호위원회 권고, ICRP 103 간행물 (한글판), KARP, 2009



25. 김희근, 공태영, 정우태, 김석태. 원전에서 발생하는 주요 방사성핵종들이 방사선 작업종사자와 원전 주변주민의 피폭방사선량 평가에 미치는 영향, Journal of Radiation Protection, 35(1), 12-20 (2010).
26. Nuclear Safety and Security Commission of Korea, Regulations on Criteria and Inspection of Registration for Dosimeter Reading Service, Notification 2012-67, (2012).
27. Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd, Final Safety Analysis Report for Kori Unit 1&2, (2010).
28. 송명재, 김희근, 김봉환, 장시영. PWR 발전소에서 방사선장 특성. 방사선방어학회지. 1992;17(2).
29. Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd, Final Safety Analysis Report for Hanbit Unit 3&4, (2010).
30. Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd, Final Safety Analysis Report for Hanul Unit 1&2, (2010).
31. Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd, Final Safety Analysis Report for Wolsong Unit 1&2, (2010).
32. 한국수력원자력(주) 한빛 제2발전소. 원전종사자 방사선관리체계 적합성 자체진단 보고서(초안). 2009.
33. 한국수력원자력(주). 원자력발전소 표준 기술행정 절차서-내부피폭 방사선량 측정 및 평가. 표준기행 방사선-06, 2008.
34. Ontario Power Generation(OPG). Ontario Hydro Radiation Protection Dosimetry Programme. IR-11 (Revision 2), 1992.
35. Ontario Power Generation. Summary of Changes to the Method of Assigning Dose from Multiple TLD Badges, 2002.
36. Advisory Committee on Radiological Protection of Canada. Report on External Occupational Dosimetry in Canada. 1995.
37. National Council on Radiation Protection and Measurements. Use of Personal Monitors to Estimate Effective Dose Equivalent and Dose to Workers for External Exposure to Low-LET Radiation. NCRP Report No.122, Bethesda, 1995.

38. American National Standards Institute (ANSI). An American National Standard Criteria for Performing Multiple Dosimetry. Report No. HPS N13.41, 1997.
39. Nuclear Regulatory Commission (NRC). NRC Regulatory Issue Summary 2004-01: Method for Estimating Effective Dose Equivalent from External Radiation Sources Using Two Dosimeters. Report No. RIS 2004-01, 2004.
40. Xu G, Reece WD, Poston JW. A Study of the Angular Dependence Problem in Effective Dose Equivalent Assessment. Health Physics, 68(2), 1995:214-224.
41. Lakshmanan AR, Kher RK, Supe SJ. Estimation of Effective Dose Equivalent Using Individual Dosimeters, Radat. Prot. Dosim. 35(4), 1991:247-252.
42. Kim, CH. Use of Two Dosimeters for Better Estimation of Effective Dose. College Station, TX: Texas A&M University, 1998.
43. Kim, CH, Reece, WD, Poston JW. Development of a Two-dosimeter Algorithm for Better Estimation of Effective Dose Equivalent and Effective Dose. Radat. Prot. Dosim. 81(2), 1999:101-112.
44. 吉澤 道夫, 水下 誠一. 「外部被ばく及び内部被ばくの評価法に係る技術的指針」について. 保健物理 34(3). 1999:319-322.
45. H. G. Kim and T. Y. Kong. One Way for the Two-Dosimeter Method, Nuclear Engineering International, 2009 Nov:15-18.
46. Kim CH, Cho S, Jeong JH, Bolch WE, Reece WD. Poston W. Development of New Two-Dosimeter Algorithm for Effective Dose in ICRP Publication 103. Health Physics. 2011;100(5):462-467.
47. 김희근, 공태영. 원전 불균일 방사선장하에서 유효선량 평가를 위한 복수선량계 알고리즘 적용방안 연구, Journal of Radiation Protection. 2008;33(4):151-160.
48. 교육과학기술부. 고시 제2008-31호: 방사선방호등에 관한 기준 고시, 2008.
49. American National Standard Institute. An American National Standard - Performing Testing of Extremity Dosimeters. ANSI N13.32, 1995.
50. 한국수력원자력(주). 원전종사자 말단선량계 말단선량계 방사선량 측정 평가 기술 개발 최종보고서, 2009.
51. Ocken H. Techniques for Controlling Radiation Exposure. Nuclear News. 1993 February.

## 감사의 글

조선대학교 대학원에 입학했을 때가 엇그제 같은데 벌써 2년 반이라는 시간이 흘렀습니다. 저에게 늦게나마 대학원 박사과정을 등록하고, 박사과정을 무사히 마칠 수 있게 해주고, 박사논문을 쓸 수 있게 해준 여러 분들에게 이 자리를 빌려 감사의 마음을 전합니다. 먼저 논문 심사위원장을 맡아주신 정운관교수님과 심사위원을 맡아주신 이경진교수님, 송종순교수님, 나만균교수님 그리고 KINGS 노명섭교수님께도 감사를 드립니다. 그리고 지금은 퇴직하신 김송평교수님께도 감사의 말씀을 전합니다. 특히, 이 논문을 작성하기까지 논문지도 교수님으로, 저에게 지속적인 가르침과 많은 조언을 해주신 이경진교수님께 감사를 드립니다.

어려운 여건 속에서 대학원 박사과정을 무사히 끝낼 수 있었던 것은 제가 근무하는 한수원중앙연구원의 배려가 있었다고 생각합니다. 이름을 모두 열거할 수 없지만, 직장동료의 보이지 않는 배려와 격려를 기억하고 있습니다. 특히, 방사선환경연구소의 소장님과 직원 여러분들의 협조를 감사히 여기고 있습니다. 제가 팀장으로 같이 근무하는 해체기술팀의 팀원께 감사의 마음을 어루러 전합니다. 특히 미국에서 박사 학위 과정 중에 있는 공태영차장님과 방사선안전그룹의 고종현과장님께도 감사의 말씀을 전합니다. 두 연구원의 협조와 배려를 기억하고, 깊이 간직하고 있습니다. 한수원중앙연구원이 기업체부설 연구소로서 국책연구소와 상대적으로 어려운 여건 속에서, 원전 현장에서 일어나는 방사선안전관리에 문제와 방사선분야의 규제 현안을 정리하여 논문을 작성하는 데는, 원전 방사선안전관리와 관련된 현장과 본사 등의 협조가 적극 있었기에 가능했다고 생각하고 있습니다.

오늘 이 자리는 가족의 협조가 절대적이었습니다. 희노애락을 같이하는 평생의 동반자로서 사랑하는 은희, 두 아들 동현과 동영이에게도 감사의 이야기를 전하고자 합니다. 지금도 고향에 계신 부모님과 처가의 장인어른과 장모님께도 감사의 말씀을 전하고자 합니다. 저와 관련되는 주위 모든 분들께 항상 감사하게 생각합니다.