

전자개인선량계(EPD)의 외부피폭방사선량 평가 성능분석

이병일*, 김태진*, 임영기†

*한국수력원자력(주) 방사선보건원, †가천대학교 방사선학과

2015년 8월 18일 접수 / 2015년 9월 16일 1차 수정 / 2015년 11월 10일 2차 수정 / 2015년 11월 13일 채택

원전에서 방사선작업종사자의 개인선량평가에 보조선량계로 사용되고 있는 전자개인선량계(EPD)의 성능이 지속적으로 개선되고 있어, EPD의 외부피폭방사선량 평가성능을 확인하고자 해외 EPD 운영 사례, 국내 현황조사, EPD 원전 현장실험 등을 다각적으로 수행하였다. 원전현장에서 실시한 성능검증 시험결과는 IAEA와 EURADOS가 공동으로 실시한 EPD 비교검증(IAEA-TECDOC-1564) 결과와 유사하였다. 또한 국내원전 피폭방사선량 비교결과(5년간 EPD/TLD 값)는 일본 JAPC의 비교결과(EPD/필름벤티 값)와 유사한 경향성을 보였으며, TLD보다 EPD가 피폭방사선량을 보수적으로 평가하는 것을 확인하였다. EPD의 성능 중 가장 우려되는 것이 기능적 오류발생이다. 기술적 발전에 힘입어 EPD의 오류발생이 지속적으로 개선되고 있음을 국내원전 분석자료 및 INFO의 오류경향 분석사례에서 확인할 수 있다. 결론적으로 성능검증 프로세스 구축 및 기능적 오류 대비방안을 체계적으로 마련할 경우 EPD의 성능은 TLD와 비교해서 손색이 없을 것으로 판단된다.

중심어 : EPD, TLD, 능동형선량계, 수동형선량계, 원전

1. 서론

국내 원전에서는 방사선작업종사자에 대한 외부피폭 방사선량을 평가하기 위한 주선량계로 수동형선량계인 Harshaw(社)와 Panasonic(社)의 열형광선량계(thermoluminescent dosimeter, TLD)를 사용하고 있으며, 보조선량계로 MGP(社)와 Thermo(社)의 능동형선량계인 EPD를 주로 사용하고 있다(Table. 1).

국내원전의 경우 TLD 선량과 EPD 선량을 합산하여 방사선관리구역의 출입을 통제하고 있으며, 일정 시점이 지나면 EPD 선량을 제외하고 새로운 TLD 선량을 합산하는 등 출입통제를 위한 방사선피폭선량 관리가 어렵고, 최적의 ALARA 수행을 위하여 EPD선량을 TLD선량으로 환산한 다음 작업별로 방사선피폭선량을 분석하는 등 매우 복잡한 형태의 선량관리 업무를 수행하고 있는 실정이다. 다중선량계 착용에 따른 경영비용 및 운영인력 측면 또한 이번 연구를 시작하게 된 계기로 작용하였다.

미국, 프랑스 등 대부분의 국가들도 우리나라와 유사한 외부피폭방사선량 평가체계를 운영하고 있는데, 반면에 영국과 일본의 원전에서는 EPD를 주선량계로 사용하고 있다. 영국에서는 개인선량계가 수동형인지 능동형인지 여부와 관계없이 기술기준[1]에 적합할 경우 주선량계로 사용할 수 있으며, 일본의 경우는 주선량계의 사용에

Table 1. Status of Possession of Personal Dosimeter in Korean NPPs (2015).

Dosimeter	Model	Nuclear power plants
Legal dosimeter	Harshaw	Kori 1-4, Shin-kori 1-2, Hanbit 5-6, Hanul 1-6, Wolsong 3-4, Shin-wolsong 1-2
	Panasonic	Shin-kori 3-4, Hanbit 1-4, Hanul 5-6, Wolsong 1-2
	Thermo (EPD-G)	Kori 1-4, Shin-kori 1-2, Wolsong 3-4, Shin-wolsong 1-2
Secondary dosimeter	Fuji (NRF30)	Hanbit 3-4
	MGP (DMC2000S, DMC2000XB)	Shin-kori 3-4, Hanbit 1-2, Hanbit 5-6, Wolsong 1-4, Hanul 1-6

관한 기준이 없다. 다만 일본 방사선영향협회(Radiation Effect Association)에서 정한 절차(線量登録管理制度, <http://www.rea.or.jp/chutou/choutouindex-new.htm>)를 이행하기 위하여 원전 방사선작업종사자들은 각 기간별(일일, 분기, 연간, 5년간) 선량평가를 위한 선량계와 과피폭을 방지하기 위한 경보기능의 선량계를 착용해야 한다. 일본원자력주식회사(Japan Atomic Power Company)는 다중선량계 착용의 문제점을 개선하기 위한 연구를 수행하였으며, 그 결과(Fig. 1) (www.irpa.net/irpa10/cdrom/00455.pdf)에 근거하여 2000년부터 EPD를 주선량계로 사용하기 시작하였고, 현재는 동경전력 등에

책임저자 : 임영기, yklim@gachon.ac.kr
인원 연구구 합박피로 191, 가천대학교 방사선학과

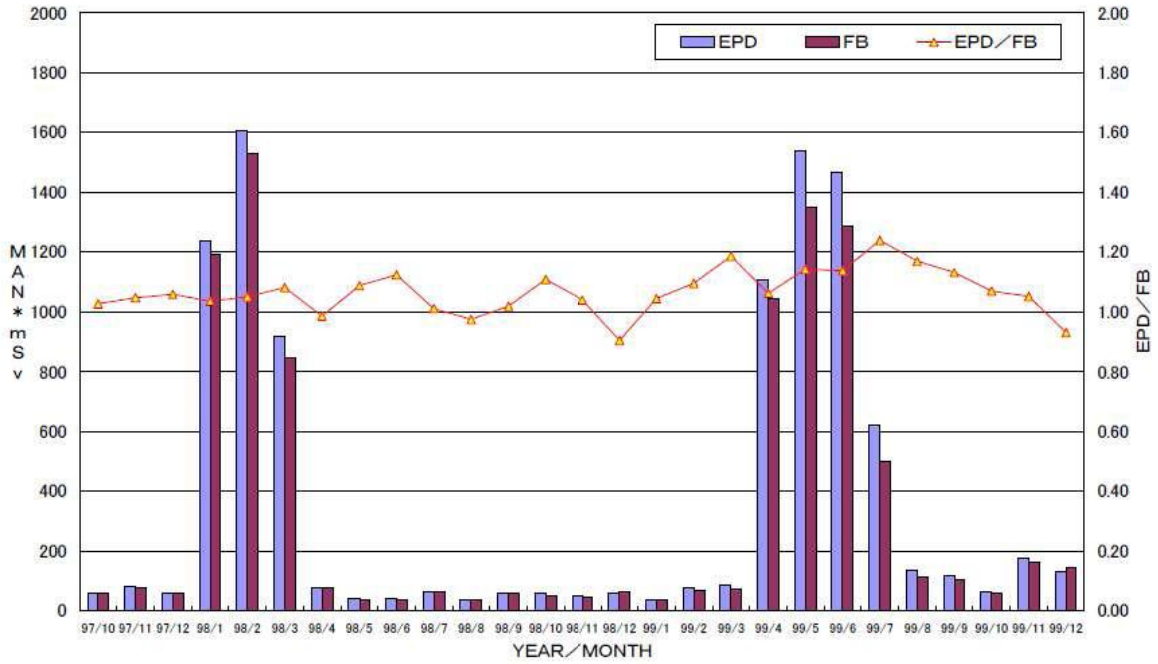


Fig. 1. Comparison between EPD and film-badge monthly dose (JAPC).

Table 2. Summary of EPD Performance Test (IAEA-TECDOC-1564).

Type of EPD	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Relative intrinsic error photon radiation (¹³⁷ Cs)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Photon energy response	33-1500 keV	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
	60-1500 keV	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Angle of incidence (0±60°)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Influence of dose rate	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○
Statistical fluctuation for Hp(10)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Statistical fluctuation for Hp(0.07)	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○
A : AT3509B	B : DMC2000XB		C : Mk2		D : DMC2000X		E : PM1621						
F : ED150	G : SAICPD2i		H : PM1604A		I : AT2503		J : RAD60S						
K : DMC2000S	L : Dosi-card		M : NED30										

서도 EPD를 주선량계로 사용하고 있다.

또한 EPD의 성능에 대한 각국의 관심이 증대됨에 따라 IAEA에서는 EPD에 대한 성능정보를 명확하게 제공할 목적으로 EURADOS와 공동으로 IEC 61526 (International Electrotechnical Commission) 기준에 펄스 및 혼합 방사선장을 추가하여 EPD 13종류에 대한 성능시험을 수행하였다(IAEA-TECDOC-1564) [2,3]. 성능시험 결과, 특수목적에 사용하기 위하여 제작된 모델은 저에너지 광자 범주 등에서 성능기준에 미달되었지만, 일부 모델은 모든 성능기준을 만족하고 있다(Table. 2). 한국수력원자력(주) 중앙연구원에서 표준선장에서 수행한 성능시험 또한 위와 같은 유사한 결과를 보이고 있는데, 원전에서 사용하고 있는 3개사 6개 모델 중 3개의 모델이 70 keV 미만의 저에너지 광자 범주에서 합격기준을 벗어나고 있지만 3개의 모델은 성능기준을 만족하고 있다(한국수력원자력 중앙연구원, 외부피폭선량계 시험용 표준방사선

장 구축 및 시험방법 개선, 2014).

EPD 오류에 관한 유럽의 관련기관 설문조사(2004년)에 따르면 오류의 유형은 기계적 결함, 배터리 수명, 기능적 오작동, 알람 오작동, 데이터 신뢰성 문제 순이었다 (Fig. 2) [4]. 반면에 INPO에 보고된 EPD 오류내용 분석 결과를 살펴보면 2004년 이전에는 기능적 오류가 많았으나 EPD의 기술발전에 힘입어 2004년 이후에는 기능적 오류는 감소하고 관리측면의 오류가 증가하는 것을 확인할 수 있다(Table. 3) (한국수력원자력 KONIS 원자력기술정보시스템 해외정보 자료, 2011).

국제기관 및 국내외에서 수행한 EPD 성능검증은 표준선장 하에서 이루어진 것이 대부분이며, 실제 원자력발전소 방사선관리구역 내에서 EPD에 대한 성능을 검증한 사례는 거의 없는 실정이어서 국내 원전에 도입된 EPD를 포함하여 EPD의 외부피폭방사선량 평가성능을 분석하고자 하였다.

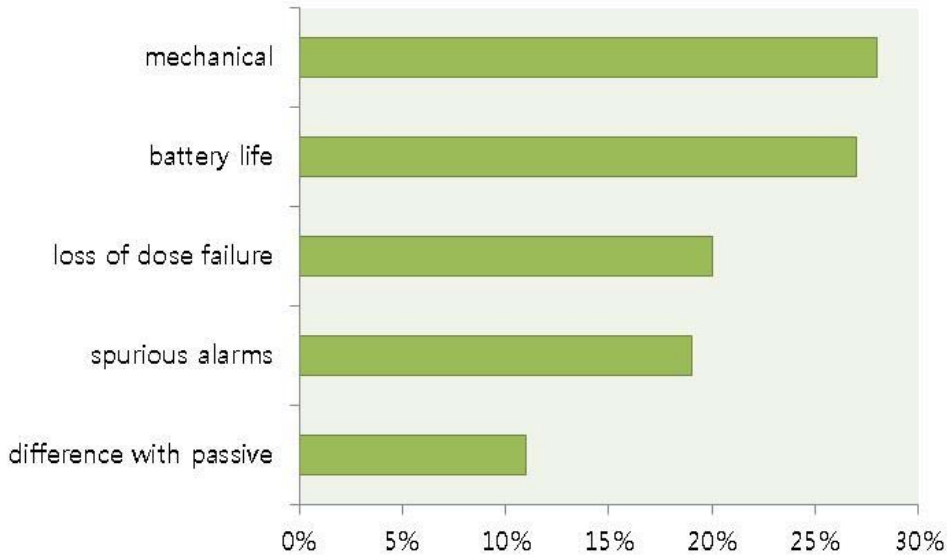


Fig. 2. Rating of major problems with EPD use as indicated by users (2004).

Table 3. Error Type of EPD by Year (INPO).

Year	Functional errors*	Administrative errors†	Total
2000	1	0	1
2001	4	1	5
2002	2	0	2
2003	3	0	3
2004	3	0	3
2006	1	0	1
2007	1	1	2
2008	1	3	4
2009	1	2	3
2010	0	2	2
Total	17	9	26

*Power, voltage, battery, alarm, circuit, program errors

†Access management, read assessment, handling, estimation errors

2. 재료 및 방법

2.1 피폭방사선량 분율(EPD/TLD) 분석

5년간(2007년~2011년) 원전 방사선작업종사자 피폭방사선량의 EPD/TLD 분율 분석에 한국수력원자력(주)에서 방사선피폭선량 관리시스템으로 운영중인 방사선안전관리(radiation management, RAM) 시스템을 이용하였으며, RAM 시스템에는 다양한 형태의 방사선피폭선량 데이터베이스가 구축되어 있다. TLD와 EPD간의 성능을 효과적으로 분석하기 위하여 주로 저선량을 작업을 수행하는 정상운전 중 집단선량과 상대적으로 고선량을 작업을 수행하는 계획예방정비기간 중 집단선량으로 구분하여 데이터를 추출하였다. 아울러, Harshaw社 TLD와 Panasonic社 TLD의 EPD와의 반응특성을 확인하기 위하여 세부적으로 구분하여 데이터를 추출하였다.

2.2 원전현장 성능 비교시험

첫 번째로 'A' 발전소에서 EPD와 TLD의 선량선형성 비교실험을 수행하였으며, 한국표준과학연구원에 의뢰하여 제작한 water slab phantom이 사용되었다. Phantom은 ICRP-74에서 권고하고 있는 폴리메틸메타아크릴(polymethyl methacrylate, PMMA) 물질로 구성되어 있으며, 크기는 30 cm × 30 cm × 15 cm, 두께는 앞면 0.3 cm, 기타 부분은 1 cm이고, 내부는 증류수로 채울 수 있게 제작되었다(Fig. 3.). Phantom 전면부에 Panasonic社의 UD-802 TLD 3개와 Thermo社의 EPD-Mk2 1개를 부착하여 현장에 설치하였으며, 100분, 1125분, 1595분 경과 후 TLD를 각각 1개씩 회수하여 판독하였다.

두 번째로 'B' 발전소에서 EPD간 선량선형성 비교시험을 수행하였으며, water slab phantom에 MGP社의 DMC-2000XB와 DMC-2000S, Fuji社의 NRF-30, Thermo社의 EPD-G와 EPD-Mk2 등 종류가 다른 5개의 EPD를



Fig. 3. Water slab phantom made by KRISS.

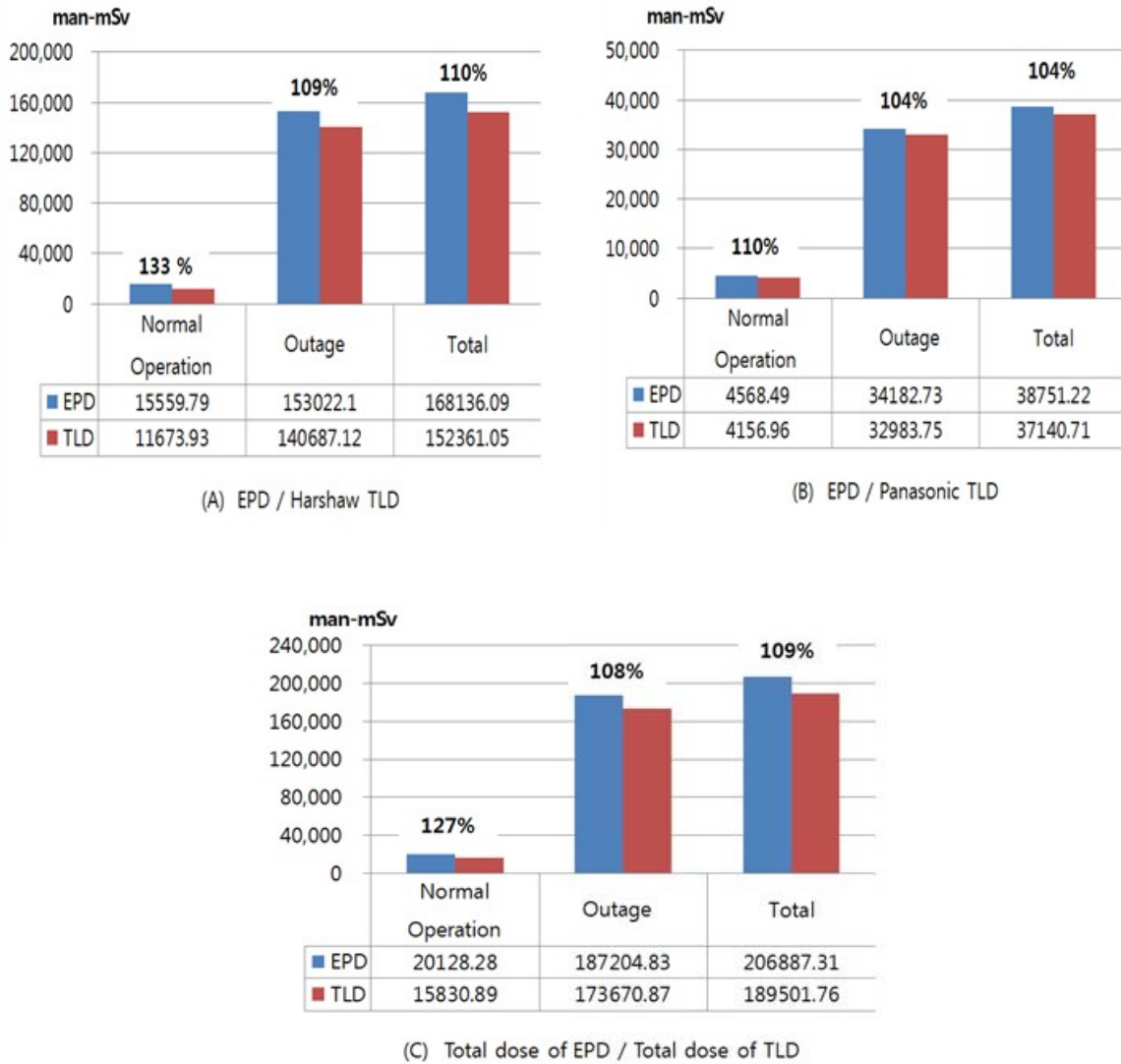


Fig. 4. Result of TLD and EPD dose 5 years (2007-2011) in Korean whole NPPs.

부착하여 795 분, 1185 분, 1470 분, 2215 분 경과할 때마다 EPD-Mk2 누적선량을 기준선량으로 하여 4 종류의 EPD에 대한 선량선형성을 비교하였다.

2.3 EPD의 기능적 오류분석

원자력발전소에서 보조선량계로 사용하는 EPD는 법적 규제요건이 없기 때문에 발전소 운영절차서에 따라 자체적으로 관리하고 있으며, EPD에 대한 오류정보 또한 운영절차서에 의거하여 관리되고 있다. 1년간(2011년도) 기계적 오류, 배터리 방전, 분실 및 관독오류, 경보 오류, 전자기파 영향, 오염에 의한 훼손 등 기능적 오류에 대한 현장 경험자료를 입수하여 분석하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 TLD 및 EPD의 피폭방사선량 분율 분석

Fig. 4는 5년간(2007년 ~ 2011년) 국내원전의 TLD 및

EPD 선량을 비교한 결과이다. 정상운전 중 EPD 선량이 Harshaw TLD 선량 대비 133%, Panasonic TLD 선량 대비 110%로, 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 정상운전 중에는 대부분의 작업을 저선량률 지역에서 수행하게 되는데, 낮은 선량률에서 측정정능이 EPD가 TLD보다 상대적으로 우수한 것에 기인하는 것으로 판단된다. 계획예방정비기간 중에는 EPD 선량이 Harshaw TLD 선량 대비 109%, Panasonic TLD 선량 대비 104%로, 상대적으로 낮은 차이를 보이고 있다. 특이할 점은 Harshaw TLD가 Panasonic TLD에 비해 일관되게 높게 나타나고 있는데, 이는 TLD별 고유의 반응특성에 따른 것이다. 종합적으로 EPD 선량이 TLD 선량 대비 109% 높게 분석되었으며, 일본 JAPC의 분석결과(Fig. 1)와 유사한 경향성을 보이고 있다.

3.2 원전현장 선량선형성 비교시험

원전현장에서 수행한 두 가지 선량선형성 비교실험 중 가장 높은 선량률인 0.24~0.28 mSv · h⁻¹ 방사선장에

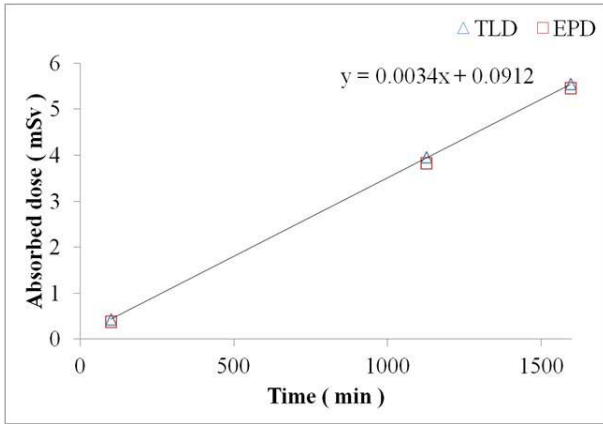


Fig. 5. Result of dose linearity test for TLD and EPD.

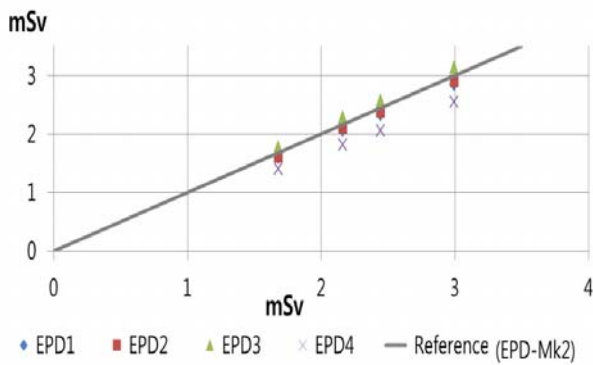


Fig. 6. Result of dose linearity test for 5 types of EPD.

서는 EPD와 TLD간 선량선형성이 매우 양호하게 유지되고 있음을 확인할 수 있었다(Fig. 5).

원전에서 사용 중인 모든 모델을 포함한 EPD간 선량선형성 비교시험은 0.1 mSv · h⁻¹ 내외의 방사선장에서 장시간에 걸쳐 수행되었다(Fig. 6). 3 개의 EPD는 양호한 선량선형성과 기준선량(EPD-Mk2) 대비 5% 내외의 오차범위를 보이고 있으나, 1 개의 EPD는 선량선형성은 양호한 반면 기준선량 대비 오차범위가 상대적으로 크게 나타나고 있다. 이의 원인으로는 기준선량을 확인할 수 없는 현장여건에서 임의적으로 EPD-Mk2 선량을 기준으로 정한 영향인 것으로 판단된다.

3.3 EPD의 기능적 오류 분석

원전 개인선량계의 기능적 오류에 대하여 분석한 결과는 Table. 4와 같다. EPD의 기계적 결함이 다소 높고, 배터리 문제가 여전히 존재하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 기계적 결함, 배터리 수명, 기능적 오작동, 알람 오작동, 데이터 신뢰성 문제 순으로 오류의 유형을 보인 유럽의 관련기관 설문조사(Fig. 2)와 유사한 경향을 보인다. 다만, 현재 원전에서 EPD를 보조선량계로 사용하고 있어 TLD가 EPD보다 더욱 세심하게 관리되고 있다는 점과 기능적 오류는 감소하고 관리측면의 오류가 증가하고 있다는 INPO의 EPD 오류경향 분석결과(Table. 3) 등을 고려할 경우 오류발생 비율이 지속적으로 줄어들 것으로 판단된다.

Table 4. Analysis of EPD Failure Cases in Domestic NPPs by the Two Units (2011).

Category	Results
Possession	· About 1000
Life	· About 10 years
Mechanical failure	· 2 times - 20 times per year
Battery discharge in work	· 0 times - 10 times per year
Loss dosimeter or read failure	· 0 times - 2 times per year (loss) · 0 times - 2 times per year (read failure)
Alarm failure	· 0 times
Electromagnetic influences	· 0 times
Damaged by contamination	· 0 times - 3 times per year

4. 결론

EPD의 장점은 검출성능의 우수성, 실시간 피폭관리, 고방사선 작업에 대한 경보 기능, 효율적이고 간편한 피폭방사선량관리 등 ALARA에 매우 유용한 도구로 사용할 수 있다는 것이다. 이러한 장점 때문에 영국과 일본은 물론 IAEA와 같은 국제기구 또한 EPD에 대한 관심이 높으며, 이번 연구에서도 피폭방사선량 측정성능 및 기능적 오류 측면에서 EPD의 성능이 지속적으로 발전하고 있음을 확인할 수 있었다. EPD와 TLD간 피폭방사선량 분율을 분석하기 위해 수행한 5 년간 원전작업종사자 선량 비교결과와 원전현장에서 수행한 성능시험 결과, 대부분의 EPD가 TLD와 유사한 성능을 보여주고 있다. 다만, 현재 원전에서 보유하고 있는 모든 EPD가 DOELAP Algorithm[5]에서 권고하고 있는 원전현장의 최소 광자 에너지인 280 keV 이상에서 성능기준을 만족하는 것으로 확인되고 있지만, 일부 발전소의 경우 70 keV 미만의 저에너지에서도 성능이 만족되는 EPD를 확보하여야 할 것이다. EPD의 기능적 오류경향 또한 지속적으로 개선되고 있어 관리측면의 프로세스를 강화할 경우 TLD와 비교하여 EPD의 성능 저해요인으로 작용하지는 않을 것으로 판단된다.

이번 연구는 원전현장에서 EPD의 기능적 성능검중에 국한하여 수행되었으므로 앞으로도 다양한 형태의 후속 연구가 필요하다. 후속 연구를 통하여 향후 EPD의 성능 검증 및 검 · 교정, 피폭방사선량 평가 프로세스 등 성능을 신뢰할 수 있는 체계가 확고히 마련되고, 기계적 결함, 배터리 방전 등에 대비한 데이터 보존체계의 확보와 원전 전원상실 사고 등 비상시 선량평가 대책을 구체적으로 강구할 경우, EPD의 성능 또한 TLD의 성능기준을 만족하게 될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국수력원자력(주)에서 원전종사자 피폭방사선량 평가기술 선진화 방안연구의 일환으로 수행되었습니다. 원전현장 실험에 많은 도움을 주신 고리, 한빛,

한울, 월성원자력본부의 관계자 분들께 지면을 통해 감사의 말씀을 전합니다.

REFERENCES

1. Health and Safety Executive. The ionising radiations regulations 1999. Health and Safety Executive IRR99. 1999.
2. International Electrotechnical Commission. Radiation protection instrumentation-measurement of personal dose equivalents Hp(10) and Hp(0.07) for X, gamma, neutron and beta radiations-direct reading personal dose equivalent meters and monitors. International Electrotechnical Commission IEC 61526. 2005.
3. IAEA. Intercomparison of personal dose equivalent measurements by active personal dosimeters. International Atomic Energy Agency IAEA-TECDOC-1564. 2007.
4. Bolognese-Milsztajn T, Ginjaume M, Luszik-Bhadra M, Vanhavere F, Wahl W, Weeks A. Active personal dosimeters for individual monitoring and other new development. Radiat prot dosim. 2004; 112(1):141-168.
5. U.S. Department of Energy. Standard for the performance testing of dosimetry system(DOELAB). U.S. Department of Energy DOE/EH-0027. 1986.

Performance Analysis of Electronic Personal Dosimeter(EPD) for External Radiation Dosimetry

Byoung-Il Lee*, Taejin Kim*, and Young-Khi Lim†

*Radiation Health Research Institute-Korea Hydro & Nuclear Power,

†Dept. of Radiological Science, Gachon University

Abstract - As performance of electronic personal dosimeter (EPD) used for auxiliary personal dosimeter in nuclear power plants (NPPs) has been being continuously improved, we investigated application cases in Korea and other countries and also tested it in NPPs to assess the performance of EPD for external radiation dosimetry. Result of performance tests done in domestic NPPs was similar to those obtained by IAEA in cooperation with EURADOS (IAEA-TECDOC-1564). In addition, EPD/TLD dose ratio has shown similar tendency of EPD/Film-badge dose ratio from the research by the Japan Atomic Power Company (JAPC) and EPD provided more conservative value than TLD or Film-badge. Although some EPD's failures have been discussed, EPD has shown continuous improvement according to the report of Institute of Nuclear Power Operation (INPO) and data from domestic NPPs. In conclusion, It is considered that the general performance of EPD is adequate for external radiation dosimetry compared with that of TLD, providing appropriate performance checking procedure and alternative measures for functional failure.

Keywords : EPD, TLD, Active dosimeter, Passive dosimeter, Nuclear power plant