

선량환산인자를 이용한 기체유출물 RMS 경보설정 개선방안

Alarm Setpoint Determination Method of Gaseous Effluent Radiation Monitoring Systems Using Dose Factors Based on ICRP-60 Recommendations

박규준, 김희근, 하각현, 엄희문
한전 전력연구원

요 약

ICRP-60의 방사선방호 신개념이 국내 법령에 도입됨에 따라 원전 방사성유출물 관리의 변경이 불가피한 실정이다. 방사성유출물 관리의 중요한 요소 중의 하나가 원전 방사선감시계통(Radiation Monitoring System)의 적절한 운용이다. RMS는 원자력법에 명시되어 있는 일반인의 선량한도와 배출관리기준을 만족하도록 운용되어야 한다. 방사성유출물을 제한하는 기준에 따른 RMS 경보설정치의 비교·분석을 통해 국내 원전에 적용 가능한 최적의 개선방안을 제시할 수 있다. 본 논문에선 선량한도 기준 중 가능한 모든 피폭경로를 고려하여 예상선량률을 계산한 선행 RMS 경보설정 개선방안과의 비교를 위해 주요 피폭경로만 고려하는 선량환산인자에 의한 예상선량률 계산과 RMS 경보설정 개선방안을 조사하였다.

Abstract

In Korea, the dose limits to the public were reduced according to ICRP-60 recommendations. The secondary quantities, Effluent Concentration Limits (ECLs) were derived and enacted to Korean Atomic Laws based on ICRP-60 recommendations. The Korea atomic laws require assurance that radioactive materials within gaseous effluents do not exceed dose limits and ECLs. This simply means that any effluent that would possibly contain radioactivity must be monitored. There are various methods to monitor the radioactivity of effluent monitor to satisfy the dose limits and the ECLs for gaseous effluents. The many factors (safety margin) should be considered in determining of the setpoint of effluent monitor, following these limits.

In this study, we studied the determination method of alarm setpoint for gaseous effluent Radiation Monitoring Systems using dose factors considered the main pathway of radionuclides to compare the preceding determination method of alarm setpoint for gaseous effluent RMSs using dose assessment program considered all the practicable pathways of radionuclides.

1. 서 론

원전 방사선감시계통(Radiation Monitoring System)은 원전 주변 환경으로 방출되는 유출물을 감시하는 장치로서 원전의 노후와 주변주민에 대한 안전성 확보 차원에서 그 중요성이 더욱 증가하고 있다. 국제방사선방호위원회(ICRP) ICRP-60의 후속조치로서 최대허용농도(MPC)가 연간섭

취한도(ALI)와 유도공기중농도(DAC), 배출관리기준으로 개정되어 과학기술부고시 제2002-23호 「방사선방호 등에 관한 기준」에서 법제화되었다. 이에 따라 RMS 경보설정치는 이를 근거로 변경이 필요한 상황이다[1,2].

RMS는 원전 주변의 환경상 위해방지와 일반대중 및 원전 작업종사자에 대한 방사선방호를 목적으로 방사성유출물 관리의 건전성 확보 차원에서 운용되고 있다. 원전 RMS는 원전 주변 환경으로 방출되는 방사성유출물을 감시하는 유출물(Effluent) RMS와 원전 계통내 방사성물질의 누설 여부를 점검하여 계통의 안전성을 감시하는 공정(Process) RMS, 작업자가 빈번히 출입하는 공간의 방사선량률을 감시하고 사고시 방사선 준위의 감시를 위한 지역(Area) RMS, 발전소외의 방사선량률을 감시하는 환경(Environmental) RMS 등으로 구성되어 있다[3,4].

원전에서 방출되는 방사성유출물은 원전 주변에 거주하는 일반인에게 미치는 선량(dose)이 1 mSv를 넘지 못하도록 법적으로 제한하고 있다. 과기부고시 제2002-23호에서 규정하고 있는 배기 중의 배출관리기준은 일반인이 배출관리기준에 해당하는 농도로 대기 중으로 배기된 방사성물질을 흡입(inhalation)할 경우에 연간 받는 선량이 일반인의 선량한도에 해당하는 유도된 방사능 농도 제한 값이다[5]. 반면에 일반인의 선량한도는 원전으로부터 방출된 방사성물질이 불활성기체(Noble Gas)와 입자(Particulate), 방사성옥소(Iodine)와 같은 화학적 형태에 따라 원전 주변 일반인에게 영향을 주는 가능한 모든 피폭경로를 고려하여 계산한 최대 허용연간선량이므로 방사성물질의 흡입 뿐만 아니라 섭취(ingestion), 피부노출(skin exposure)까지 포함한다.

기체상 방사성유출물이 인체에 미치는 선량을 계산하기 위해서는 원전에서 방출된 기체상 방사성유출물이 인체에 도달하기까지의 경로인 피폭경로와 피폭 대상인 일반대중을 신체적 특성과 생리적 신진대사를 고려한 피폭 연령군, 이들 중 최대로 영향을 많이 받는 연령군의 개인 선량값인 최대개인 선량, 단위 방사성물질의 피폭경로에 따라 각 연령군을 대표하는 가상개인이 받는 유효 및 장기등가선량을 적절한 단위로 정량화한 선량환산인자 등의 주요한 요소들을 고려한다[6].

일반인의 선량한도를 기준으로 원전 기체유출물 RMS 경보설정하는 방법은 피폭경로에 따라 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 하나는 기체상 방사성유출물이 인체에 도달하기까지의 가능한 모든 경로를 고려하는 방법과 다른 하나는 이들 피폭경로들 중 특정 경로만을 선정하여 고려하는 방법으로 나뉜다. 전자의 경우는 방사성물질의 흡입과 섭취, 피부노출 등을 모두 고려하는 주민선량 계산 전산프로그램을 이용하여 원전에서 방출되는 기체상 방사성유출물에 의한 선량률을 결정하는 반면, 후자의 경우는 불활성기체에 대해선 주요한 피폭경로인 피부노출만을 고려하고 입자와 방사성옥소는 흡입 경로만을 고려하는 선량환산인자를 이용하여 기체상 방사성유출물에 의한 선량률을 결정한다[7,8].

배출관리기준과 주민선량 계산 전산프로그램인 K-DOSE60을 이용한 선량한도 기준에 따른 원전 기체유출물 RMS 경보설정 개선방안은 선행 연구[9,10]를 통해 수행한 바 있다. 이 논문에선 선량환산인자를 이용한 기체유출물 RMS 경보설정 개선방안과 이를 표본원전에 적용한 결과를 선행 연구결과들과 비교·분석해 보았다.

2. 선량환산인자를 이용한 기체유출물 RMS 경보설정 개선방안

RMS의 경보설정치는 선량한도를 초과하는 방출이 발생한 경우에 울리는 고경보설정치(Alarm Setpoint)와 정상운전 범위를 벗어나는 방출이 발생한 경우에 울리는 경보예고 설정치(Warn Setpoint)가 있다[11,12]. 고경보는 일반적으로 울림과 동시에 배기구를 통한 기체 방사성유출물의 방출을 자동적으로 차단하도록 운용되며, 경보예고는 운전자가 확인을 할 수 있게 알려주는 역할만 하며 다른 연동장치가 없다. 고경보설정치의 기준이 되는 선량한도는 원자력법 시행령 제2조(정의) 5와 과기부고시 제2002-23호에 제시되어 있다.

선량환산인자를 이용한 경보설정 방법은 주민선량 계산 전산프로그램을 이용하여 일반인 선량한도에 근거한 경보설정 방법과 그 계산 절차는 거의 동일하며 다음과 같다. 기체 유출물 RMS의

고경보설정치 SP[Alarm]은 최대허용방출률 Q_m ($\mu\text{Ci}/\text{sec}$)과 방출구의 최대 배기률 F (m^3/sec)로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$SP[Alarm] = \frac{Q_m}{F} \quad (1)$$

여기서 방출구에서의 최대허용방출률은 방출원별 핵종들의 연간 예상방출률과 일반인의 최대허용선량률 및 방출원별 연간 예상선량률에 대한 다음과 같은 간단한 비례식으로부터 얻을 수 있다.

$$\text{예상방출률} : \text{최대허용방출률} = \text{예상선량률} : \text{최대허용선량률} \quad (2)$$

이 식으로부터 얻을 수 있는 최대허용방출률은 다음식과 같다.

$$Q_m = \frac{\sum_i Q_i \cdot MPD}{ED} \quad (3)$$

여기서 Q_i 는 핵종 i 의 연간 예상방출률 ($\mu\text{Ci}/\text{yr}$)이고, MPD 는 전신 또는 피부, 장기별 최대허용선량률(mrem/yr)이며, ED 는 연간 예상선량률(mrem/yr)이다.

그러나 원전 방출원별 예상방출량에 의한 부지경계선에서의 최대개인에 대한 연간 예상선량률 ED 는 앞서 언급한 바와 같이 고려하는 피폭경로의 차이로 인해 다른 값을 가진다. 선량환산인자를 이용하는 방법은 미국 원전의 기체유출물 RMS 경보설정방법이며 이는 Reg. Guide 1.109와 NUREG-0133에 그 방법론이 다음과 같이 명시되어 있다.

대기로 방출된 기체 방사성유출물 중 불활성기체에 의해 인체가 받는 선량은 노출(*exposure*)에 의한 선량으로 계산한다. 외부피폭에 의한 선량은 불활성기체 이외의 방사성물질의 경우 그 기여하는 정도가 매우 미미하므로 불활성기체만으로 평가하게 된다. 이때 사용된 모델은 반무한구 방사능운 (*semi-infinite cloud*)에 의한 인체의 잠김(*immersion*)을 가정하며, 이때 성인이 받는 유효 및 장기별 선량환산인자를 이용한다. 피폭 연령군별 차이가 있을 수 있으나 모든 피폭 연령군에 적용한다. 방사능운의 잠김에 의한 외부피폭 선량환산인자는 미국 Oak Ridge National Lab.의 Eckerman 등이 개발한 DFEXT 코드의 값을 사용한다[6,7,13]. 외부피폭 선량환산인자를 이용한 불활성기체에 의한 예상선량률(*Expected Dose rate*)은 다음과 같은 관계식으로부터 얻을 수 있다.

$$ED = \overline{\chi/Q} \cdot \sum_i (K_i \cdot Q_i) \quad (4)$$

또는

$$ED = \overline{\chi/Q} \cdot \sum_i [(L_i + 1.1M_i) \cdot Q_i] \quad (5)$$

여기서, $\overline{\chi/Q}$ 는 최대 연평균 대기확산계수(sec/m^3)이며, K_i 는 불활성기체 i 의 감마 방출에 의한 전신 선량환산인자 (*total body dose factor*) ($\text{mrem}/\text{yr per } \mu\text{Ci}/\text{m}^3$)이고, L_i 는 불활성기체 i 의 베타 방출에 의한 피부 선량환산인자 (*skin dose factor*) ($\text{mrem}/\text{yr per } \mu\text{Ci}/\text{m}^3$), M_i 는 불활성기체 i 의 감마 방출에 의한 공기 중 선량환산인자 (*air dose factor*) ($\text{mrad}/\text{yr per } \mu\text{Ci}/\text{m}^3$)이며, Q_i 는 모든 방출원에서의 기체유출물 중 불활성기체 i 의 방출률($\mu\text{Ci}/\text{sec}$)이다. 또 1.1은 1.1 mrem/mrad 의 변환상수로서 피부선량 1.1 mrem 이 공기 중 선량 (*air dose*) 1.0 mrad 와 동일함을 의미한다. 위

(4)와 (5)식으로부터 얻은 전신과 피부에 대한 예상선량률 중에서 더 보수적인 값을 선택하여 불활성기체에 대한 최대허용선량률을 (3)식으로부터 얻어낸다. 왜냐하면, 전신과 피부에 대한 일반인의 선량한도를 모두 만족해야 하기 때문이다. 이때 최대허용선량률은 보수적인 값을 가지는 전신 또는 피부에 대한 값을 사용한다.

기체 방사성유출물 중 입자와 방사성옥소에 의해 인체가 받는 선량은 흡입에 의한 선량으로 계산한다. 미국 Indian Point 3의 Offsite Dose Calculation Manual의 Radiological Effluent ControlS의 보고에 따르면 Iodine 131과 Tritium, 8일 이상의 반감기를 가지고 있는 입자 형태의 모든 기체방사성물질이 주요하게 인체에 영향을 미치는 장기는 소아의 갑상선 (child thyroid)으로 보고하고 있다. 이런 가정 하에서 입자와 방사성옥소 형태의 기체 방사성유출물에 의한 예상선량률 (Expected Dose rate)은 다음과 같은 간단한 식으로부터 얻을 수 있다.

$$ED = \overline{\chi/Q} \cdot \sum_i (P_i \cdot Q_i) \quad (6)$$

여기서, P_i 는 호흡경로에 대한 불활성기체 이외의 방사성핵종 i 에 대한 선량환산인자(mrem/yr per $\mu\text{Ci}/\text{m}^3$), Q_i 는 모든 방출원에서의 불활성기체 이외의 방사성핵종 i 의 방출률($\mu\text{Ci}/\text{sec}$)이다. 특히 선량환산인자 P_i 는 다음의 식으로부터 얻을 수 있다.

$$P_i(\text{inhalation}) = K'(BR)DFA_i \quad (7)$$

이 식에서 K' 는 변환상수로서 10^6 pCi/ μCi 이며, BR 은 각 연령군의 호흡률(breathing rate) (m^3/yr), DFA_i 는 핵종 i 와 각 연령군 및 장기에 대한 흡입 선량환산계수 (inhalation dose factor) (mrem/pCi)이다. 여기서는 DFA_i 를 Reg. Guide 1.109에서 제시하고 있는 유아(infant)의 흡입경로에 따른 선량환산인자로서 장기별 값 중 제일 큰 값을 적용하고, 유아의 호흡률인 $1400 \text{ m}^3/\text{yr}$ 값을 사용하여 다음과 같은 선량환산인자를 사용한다[14].

$$P_i(\text{inhalation}) = 1.4 \times 10^9 DFA_i \quad (8)$$

3. 원전 적용성 비교 및 분석

선량환산인자를 이용한 기체유출물 RMS 중 불활성기체 감시기의 경보설정을 표본 원전의 1개 호기에 대해 적용한 결과는 Figure 1과 같았다. 선행 연구결과와 비교해 볼 때 불활성기체 감시기의 경보설정치 경우에는 주민선량 계산 전산프로그램인 K-DOSE60에 의한 RMS 경보설정 결과치와 선량환산인자를 이용한 RMS 경보설정 결과치가 거의 같은 값을 나타내었다. 이는 불활성기체에 의한 피폭의 주요 경로가 외부피폭에 의한 것임을 보여준다. 그리고 배출관리기준에 의한 경보설정치에 비해 선량한도를 기준으로 계산한 경보설정치가 약간 낮아지는 경향을 보였다.

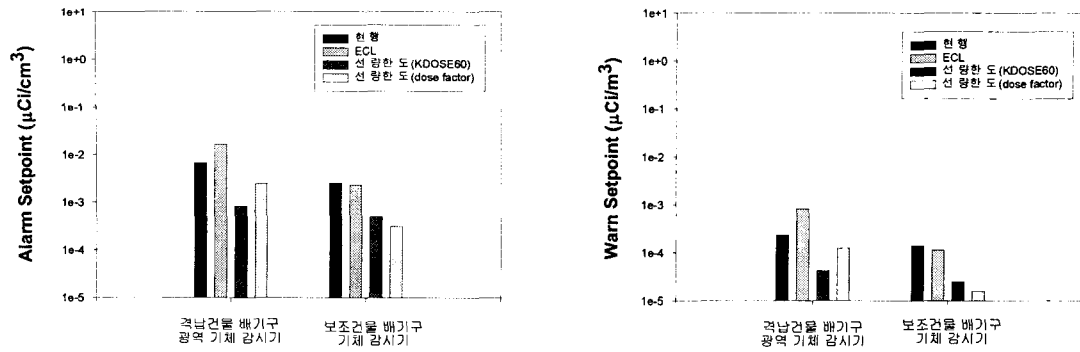


Figure 1. 표본원전의 기체유출물 RMS(G) 경보설정치 비교

4. 결 론

원자력법에서 규정하고 있는 일반인의 선량한도의 하향에 따라 원전 RMS 경보설정값의 변경이 필요하다. 본 논문에서는 선행 연구결과인 배출관리기준과 가능한 모든 피폭경로를 고려한 선량한도 기준에 따른 기체유출물 RMS 경보설정 개선 방안과 병행하여 주요한 피폭경로만 고려한 선량환산인자를 이용한 선량한도 기준의 RMS 경보설정 개선 방안을 살펴보았다. 선량환산인자를 이용한 기체 유출물 RMS 경보설정 개선 방안을 표본원전에 적용한 결과 현행 경보설정치와 배출관리기준에 의한 경보설정치에 비해 다소 감소하는 경향을 보였다. 이 결과를 바탕으로 향후 국내 다수 원전에 적용하여 원전 적용성을 충분히 반영하여 최적의 유출물 RMS 경보설정 개선방안을 제시하고자 한다.

참 고 문 헌

1. 김희근, 홍승열, 김형진, 김예중, 이병일. 원전 방사선 감시계통의 경보설정 방법론개 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집, 1999.
2. 박규준, 양양희, 김희근, 김위수. 원전 방사선 유출물 감시계통의 경보설정 개선방안 및 적용. 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 2003.
3. 김희근, 이승수, 김형진, 김위수. 원전 방사선감시계통의 경보설정 방법론에 관한 현황조사. KEPRI, 2002.
4. 박규준, 양양희, 김희근, 김위수. 원전 RMS의 경보설정치와 연계한 유출물 관리(차단)방법론 검토보고서(Rev.0). KEPRI, 2003.
5. 과학기술부고시 제2002-23호. 방사선 방호 등에 관한 기준, 2003.
6. 한전 전력연구원. 원자력발전소 주변 주민선량 계산지침서(Rev.2). 한국수력원자력(주) 안전기술처, 2003.
7. Regulatory Guide 1.109. Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10 CFR Part 50, Appendix I, Revision 1. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1977.
8. Indian Point 3. Offsite Dose Calculation Manual, Rev. 15.
9. 박규준, 양양희, 김희근, 김위수. RMS 경보설정 개선방안 원전 적용성 분석. 대한방사선방어학회 춘계학술발표회 논문집, 2003.
10. 박규준, 김희근, 하각현. 선량한도 기준에 따른 유출물 RMS 경보설정 개선방안. 대한방사선방어학회 추계학술발표회 논문집, 2003.

11. KOrea Power Engineering Company, INC. Radiation Monitor Set Points Calculation, 9-762-N384-001, Younggwang 3&4. 1987.
12. 한국전력기술주식회사(KOPEC). 원전 소내방사선감시기 경보설정치 계산 (고리 1,2호기) - 원전 소내 방사선 감시계통 설비 개선 용역. 한국전력공사, 1994.
13. 한국원자력안전기술원. 방사능 방재 환경 규제기술 개발 - 주민피폭선량 평가지침 및 INDAC 사용자지침서. 과학기술부, 2000.
14. 장시영, 이병수. ICRP-60의 제도화에 따른 유출물감시기의 경보설정 방안 1단계 연구. 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 2000.

감사의 글

본 논문은 과학기술부 원자력중장기사업 “원전 비계획유출물 평가 및 주민피폭선량평가 표준 입력 변수 결정”의 일환으로 수행되었습니다.