

A Practical Methodology for Determination of Derived Intervention Levels on Relocation Following a Nuclear Accident

Won-Tae Hwang · Eun-Han Kim · Kyung-Suk Suh ·
Hyo-Joon Jeong · Moon-Hee Han and Chang-Woo Lee
Korea Atomic Energy Research Institute

원자력 사고후 주민의 이주를 위한 유도개입준위 산정의 실용적 방법론

황원태 · 김은한 · 서경석 · 정효준 · 한문희 · 이창우
한국원자력연구소

(2003년 7월 25일 접수, 2004년 5월 13일 채택)

Abstract - A practical methodology for the determination of derived intervention levels (DILs) on relocation following an accidental release of radionuclides was designed based on dose rate on the ground. The influence of DILs was investigated with respect to the change of parameter values, which are dependent on socio-environmental characteristics, in distinction from temporary and permanent relocations. The DILs on relocation showed a distinct difference depending on effective removal half-life of radionuclides following a deposition, delay time in measurement and residential characteristics. In particular, the delay time in measurement was an important factor in determination of DILs in the case of an assumption that dose rate on the ground declines in a power function, not in an exponential function. The DILs showed lower numerical values as longer effective half-life, longer delay time in measurement and longer exposure time.

Key words : accidental release, derived intervention level (DIL), temporary relocation, permanent relocation, dose rate on the ground

요약 - 원자력시설의 사고로 인한 방사성물질의 환경 누출후 주민의 이주를 위한 유도개입준위 산정의 실용적 방법론을 지표면 선량율에 근거하여 고안하였다. 이주를 요하는 기간에 따라 잠정 이주와 영구이주로 구분하여 환경특성 변수 값에 따른 유도개입준위의 영향을 고찰하였다. 이주를 위한 유도개입준위는 방사성물질의 지표 침적후 핵종의 유효 제거 반감기, 측정 지연시간, 피폭자의 거주특성 등에 따라 뚜렷이 다르게 나타났다. 특히 지표면 선량율이 지수함수 형태가 아닌 멱함수 형태의 감소를 가정하는 경우 측정 지연시간은 유도개입준위 설정에 있어 중요한 요소로 작용한다는 것을 알 수 있다. 핵종의 유효 제거반감기가 길수록, 측정 지연시간이 늦을수록 그리고 피폭자가 오염원에 노출되는 시간이 길수록 유도개입준위는 보다 낮은 값을 나타냈다.
중심어 : 원자력 사고, 유도개입준위, 잠정이주, 영구이주, 지표면 선량율

서 론

원자력시설의 사고로 방사성물질이 환경으로 누출되는 경우 주민의 방사성물질에 의한 피폭영

향 뿐 아니라 경제적, 사회적 피해 등을 최소화하기 위해서는 다양한 피폭경로에 대해 적절한 대응행위를 제시간에 취해야 한다. 이러한 사고의 피해를 최소화하기 위한 적절한 대응행위로는 대

피, 소개, 안정 요오드 복용, 이주, 음식물 섭취 금지 등이 있으며, 이들 대응행위의 유용성은 해당 부지의 환경적 특성, 기상상황, 사고의 진행 과정, 방사능 오염 정도 등에 달려있다. 이들 여러 대응행위 중에서 이주는 주로 방사능운 (radioactive plume)이 통과한 후 지표면과 건물의 표면 등에 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭과 침적된 방사성물질의 재부유 (resuspension)로 흡입에 의한 내부피폭을 제한할 목적으로 수행되며, 이주를 요하는 기간에 따라 잠정이주 (temporary relocation)와 영구이주 (permanent relocation)로 대별된다. 일반적으로 대응행위는 선량에 의한 개입준위 또는 환경에서 측정 가능한 방사성물질의 준위로부터 수행될 수 있다. 후자는 전자보다 원자력시설의 사고시 대응행위 결정에 있어서 보다 신속하고 효과적일 뿐 아니라 방사성물질에 대한 일반 대중의 수용성 (public acceptance) 측면에 있어서도 보다 효과적이다. 선량에 의한 개입준위로부터 유도된 환경매체에 존재하는 방사성물질의 준위를 국제 원자력관련기구에 따라 유도개입준위 (derived intervention levels ; DILs) 또는 운영개입준위 (operational intervention levels ; OILs)이라 말하며, 이는 선량에 의한 개입준위의 실용량 (practical quantity)이다. 유도개입준위는 피폭에 중요한 영향을 미치는 환경매체에 대해 실용적이고 측정하기 용이한 물리량으로 표현해야 하는데, 일반적으로 이주에 대한 유도개입준위의 유용한 물리량은 지표에서의 선량률과 지표면 오염밀도이다[1,2]. 여러 국제 원자력관련기구에서는 이에 대한 일반적 권고치를 제시하고 있지만 예상되는 이주 기간 등과 같은 여러 상세 정보를 제공하기에는 다소 부족한 측면이 있다.

본 연구에서 지표면 선량률에 근거하여 주민의 이주를 위한 유도개입준위 산정의 보다 실용적 방법론을 고안하였다. 이주를 요하는 기간에 따라 잠정이주와 영구이주로 구분하여 환경특성 변수 값에 따른 유도개입준위의 영향을 고찰하였다.

유도개입준위 산정 방법론

유도개입준위는 선량에 의한 개입준위와 직접 관계한다. 국제 원자력기구 (IAEA)에서는 회피선량 (avertable dose)이 10 mSv/month 이상인 경우 잠정이주를 권고하고 있으며, 일생동안 회피선량이 1 Sv 이상인 경우 또는 어떤 일정기간동안 회피선량이 10 mSv/month 이상인 경우 영구이주

를 권고하고 있다[2]. 이러한 권고치는 원자력 관련기구마다 약간의 차이는 있을 수 있지만 전반적으로 유사한 값을 나타낸다[2,3,4]. 대응행위 결정과 관련하여 여러 국제원자력관련기구에서는 특정 대응행위를 취하지 않고 일상적 생활에 따라 받는 예상선량 (projected dose)의 개념 대신 특정 대응행위를 일정기간 동안 수행하였을 때 피할 수 있는 회피선량 (avertable dose)의 개념을 적용하여 권고치 또는 기준치를 설정하고 있는 것이 최근의 추세이다[2,3]. 따라서 누적선량 (cumulative dose)이 인체에 대한 결정적 효과 (deterministic effects)의 발단치를 초과하거나 또는 장기적 의료치료 및 감시 등 특정 상황을 제외하고 대응행위 결정시점 이전에 받은 선량은 대응행위 결정에 있어서 영향을 미치지 않는다[5]. 국제 원자력관련기구에서 권고하고 있는 선량에 대한 개입준위는 일반적으로 선량의 금전가와 대응행위 수행에 따른 비용만을 고려하여 대응행위의 정당화와 최적화 과정을 통해 설정한 값이며, 해당 국가 또는 지역에 대한 사회적, 환경적 요인 등에 따라 개입준위는 달라질 수 있다.

잠정이주를 위한 유도개입준위

원자력시설의 사고로 환경으로 누출된 방사성물질은 주변의 기상 및 환경적 특성 등에 따라 대기 중으로 이동하고 중력과 강우 등에 의해 지표로 침적된다. 지표에 침적된 방사성물질은 침적 후 시간에 따라 방사능 붕괴와 기상 및 환경적 특성 등에 영향으로 제거 또는 희석된다. 이러한 방사성물질의 제거 및 희석이 침적후 시간에 따라 지수함수로 감소된다고 가정하면, 선량에 대한 개입준위 (IL_{temp} , mSv)에 대한 유도개입준위 (DIL_{temp} , mSv/hr)의 비는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{IL_{temp}}{DIL_{temp}} &= \frac{\Delta E(t_2, t_3)}{D(t_1)} = \frac{\overline{L}\Delta E'(t_2, t_3)}{D(t_1)} \\ &= \frac{\overline{L} \int_{t_1}^{t_3} D(0) e^{-\lambda t} dt}{D(0) e^{-\lambda t_1}} = \frac{\overline{L}(e^{-\lambda t_2} - e^{-\lambda t_3})}{\lambda e^{-\lambda t_1}} \\ &= \frac{\overline{L}(e^{-\lambda t_2} - e^{-\lambda t_3})}{\lambda e^{-\lambda t_1}} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$\frac{\Delta E'(t_2, t_3)}{D(t_1)} = \frac{e^{-\lambda t_2} - e^{-\lambda t_3}}{\lambda e^{-\lambda t_1}} \quad (2)$$

$D(t_1)$: 측정시점 또는 대응행위 결정시점 t_1 에
서 지표면 선량을 (mSv/hr)

$\Delta E(t_2, t_3)$: t_2 에서 t_3 동안 오염지역에서 일상
적 거주에 따른 누적선량 (mSv)

$\Delta E'(t_2, t_3)$: t_2 에서 t_3 동안 오염지역에 완전히
노출되었을 때 받는 누적선량(mSv)

\bar{L} : 평균 거주인자

λ : 핵종의 유효 제거율 (1/hr, $\lambda = \lambda_w + \lambda_d$)

λ_w : 기상 및 환경적 요소 등에 의한 핵종 제거
율 (1/hr)

λ_d : 방사능 붕괴상수 (1/hr)

원자력시설 사고의 초기 단계에 유용한 대응행
위인 대피와 달리 이주는 피폭의 영향을 받는 지
역을 완전히 벗어나는 대응행위이며, 이 경우 회
피선량과 예상선량은 거의 동일한 값을 갖는다.
따라서 식 (1)에서 $\Delta E(t_2, t_3)$ 와 $\Delta E'(t_2, t_3)$ 는
편의상 예상선량으로 표현하고 있으나 회피선량
과 동일한 의미를 갖는다. 평균 거주인자 \bar{L} 는
전 기간에 걸쳐 오염된 지역에 완전히 노출되었
을 때 받는 선량에 대한 실제 오염지역에서 거주
시간과 가옥의 방사능 차폐 등을 고려하였을 때
받는 선량의 비로 정의된다. 핵종의 유효 제거율
 λ 는 해당부지의 기상 및 환경적 특성에 따라
다양하며, 대략적으로 ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{106}Ru 의 경우
유효 제거 반감기 ($T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$)는 각각 10년,
2년, 1년 정도로 알려져 있다[6].

원자력발전소 사고의 경우 다양한 핵분열 생성
물이 환경으로 누출되며, 체르노빌 사고의 경험으
로부터 방사성물질의 침적후 수 개월 동안 지표
면 선량은 시간에 따라 지수함수가 아닌
 t^{-m} 의 멱함수 형태로 감소하는 것으로 보고되
고 있다[7]. 멱함수에서 t 는 침적후 경과시간
(day), 상수 m 은 방사성 핵종의 구성 비율에
따라 다르나 0.2에서 0.8 사이의 값을 갖는다[5,7].
이 경우 선량에 대한 개입준위에 대한 유도개입
준위의 비는 다음과 같다.

$$\frac{IL_{temp}}{DIL_{temp}} = \frac{\Delta E(t_2, t_3)}{D(t_1)} = \frac{\bar{L} \Delta E'(t_2, t_3)}{D(t_1)} =$$

$$(t_1)^m \int_{t_2}^{t_3} \bar{L} t^{-m} dt = \frac{\bar{L} ((t_3)^{1-m} - (t_2)^{1-m})}{(t_1)^{-m} (1-m)} \quad (3)$$

여기서,

$$\frac{\Delta E'(t_2, t_3)}{D(t_1)} = \frac{(t_3)^{1-m} - (t_2)^{1-m}}{(t_1)^{-m} (1-m)} \quad (4)$$

식 (4)는 식 (2)와 달리 지표면 선량율의 감소
가 지수함수가 아니어서 유도개입준위는 측정시
점 또는 대응행위 결정시점 (이하 측정시점) t_1
의 함수로 표현된다.

영구이주를 위한 유도개입준위

영구이주는 자신의 일생동안에는 다시 돌아올
것을 예상하지 않고 다른 터전으로 이동하는 잠
정이주에 비해 보다 극단적 대응행위이다. 또한
상당한 이주기간이 요구되는 경우에는 영구이주
로 간주한다. 영구이주는 일시이주에 비해 방사성
물질의 장기간 환경내 거동 예측이 필요하며, 일
반적으로 침적후 시간에 따른 방사성물질의 농도
는 지수함수로 감소한다고 가정한다[5]. 따라서
영구이주를 위한 유도개입준위는 다음 2가지 조
건으로부터 결정된 지표면 선량율을 비교하여 보
다 보수적인 값이 선택될 수 있다.

(Condition 1)

$$\bar{L} D(t=0) \int_0^{70\text{yr}} e^{-\lambda t} dt < 1 \text{ Sv} \quad (5)$$

(Condition 2)

$$\bar{L} D(t=T) = \bar{L} D(t=0) e^{-\lambda T} < 10 \text{ mSv/month} \quad (6)$$

여기서,

$D(t=0)$: 영구이주 결정 시점에서 지표면 선
량율 (mSv/hr)

T : 영구이주로 간주하는 이주기간 (\approx 2년[5])

결과 및 고찰

지표면 선량율에 근거하여 주민의 이주를 위한
보다 실용적 유도개입준위 산정 방법론을 고안하
였다. 고안된 방법론을 사용하여 환경특성 변수
값의 변화에 따른 유도개입준위의 영향을 고찰하
였다.

그림 1은 잠정이주를 위한 유도개입준위 산정
방법론에서 언급한 바와 같이 방사성물질이 지표

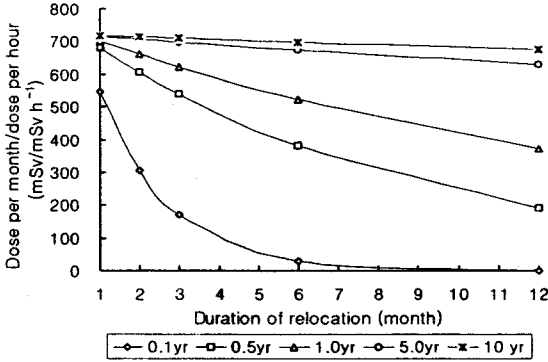


Fig. 1. Duration of relocation as a function of ratio of monthly cumulative dose with time-averaged location factor of 1 to dose rate on the ground at a measurement time, *i.e.* $\Delta E'(t_2, t_3) / D(t_1)$; It is assumed that dose rate on the ground declines in an exponential function; Legend in a box represents effective removal half-lives of radionuclides.

에 침적후 지수함수로 감소한다고 가정하는 경우, 측정시점 t_1 에서 지표면 선량율에 대한 측정 후 t_2 에서 t_3 까지 오염지역에 완전히 노출 ($\bar{L}=1$) 되었을 때 받는 월간 누적선량의 비 ($\Delta E'(t_2, t_3) / D(t_1)$, $mSv/mSv h^{-1}$)에 따른 이주기간을 핵종의 제거 반감기의 함수로 나타냈다. 지표면 선량율의 지수 함수적 감소의 가정에 따라 선량율에 대한 누적선량의 비는 측정시점 t_1 과는 무관하다. 피폭자가 전기간에 걸쳐 방사성물질로 오염된 지역에 완전히 노출되어 있고 핵종의 유효 제거 반감기를 1년으로 가정할 경우, 측정 후 적어도 6개월 동안 잠정이주를 해야 하는 지표면 선량율의 발단치는 다음과 같이 평가될 수 있다.

$$DIL_{temp} = \frac{10}{1 \cdot 524} \approx 0.02 \text{ mSv/hr}$$

마찬가지로 그림 1의 결과를 이용하여 유효 제거 반감기를 0.1년과 10년으로 가정할 경우 6개월 동안 잠정이주를 해야하는 지표면 선량율의 발단치는 각각 0.33 mSv/hr와 0.015 mSv/hr가 된다. 따라서 유효 제거 반감기가 길수록 잠정이주를 위한 지표면 선량율의 발단치는 낮아진다는 사실을 알 수 있다. 만일 평균 거주인자 $\bar{L} = 0.2$ 로 가정할 경우, 6개월 동안 잠정이주를 위한 선량율

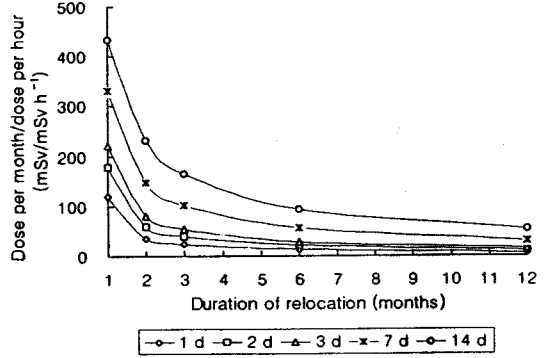


Fig. 2. Duration of relocation as a function of ratio of monthly cumulative dose with time-averaged location factor of 1 to dose rate on the ground at a measurement time, *i.e.* $\Delta E'(t_2, t_3) / D(t_1)$; It is assumed that dose rate on the ground declines in a power function, *i.e.* $t^{-0.8}$; Legend in a box represents delay times in a measurement.

의 발단치는 0.1 mSv/hr로써 $\bar{L} = 1$ 인 경우보다 5배 증가한다. 따라서 유효 제거 반감기가 길수록, 평균 거주인자가 클수록 (방사능 차폐효과가 양호하지 못한 가옥에 거주하거나 거주시간이 길수록) 잠정이주를 위한 지표면 선량율의 발단치는 낮아진다는 것을 쉽게 알 수 있다.

그림 2는 침적후 지표면 선량율의 감소를 멱함수로 가정할 경우, 방사능 운이 완전히 통과한 후 측정시점 t_1 에서의 지표면 선량율에 대한 측정 후 t_2 에서 t_3 까지 오염지역에 완전히 노출되었을 때 받는 월간 누적선량의 비에 따른 이주기간을 측정 지연시간의 함수로 나타냈다. 침적후 지표면 선량율 감소에 대한 멱함수 t^{-m} 에서 상수 m 은 0.8로 가정하였는데, 이 값은 원자로 노심에서 Cs과 I이 존재하는 것과 같은 비율로 지표면이 오염되었다고 가정하였을 경우 타당성을 가진다[5]. 이 경우 피폭자가 전기간에 걸쳐 방사성물질로 오염된 지역에 완전히 노출되어 있고 방사능 운이 완전히 통과한 후 7일의 지연시간을 가지고 선량율을 측정하였을 때 적어도 6개월간 잠정이주를 해야하는 지표면 선량율의 발단치는 다음과 같이 평가된다.

$$DIL_{temp} = \frac{10}{1 \cdot 56} \approx 0.2 \text{ mSv/hr}$$

방사능운이 완전히 통과한 후 1일과 14일의 지

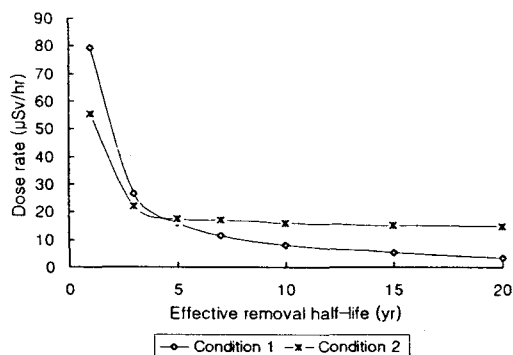


Fig. 3. Dose rate on the ground at a measurement time for permanent relocation as a function of effective removal half-lives of radionuclides with time-averaged location factor of 1 ; Condition 1 and Condition 2 represent the results based on lifetime and monthly cumulative doses, respectively.

연시간을 가지고 지표면 선량율을 측정하였을 때 적어도 6개월간 잠정이주를 해야하는 지표면 선량율의 발단치는 각각 0.8 mSv/hr와 0.1 mSv/hr을 나타냈다. 이는 그림 1의 경우와 달리 방사능이 완전히 통과한 후 측정 지연시간은 유도개입준위 설정에 있어 중요한 요소로 작용한다는 사실을 나타낸다.

그림 3은 피폭자가 오염지역에 완전히 노출되었을 때 두 가지 조건, 즉 월간 누적 선량 및 일생동안 누적선량에 근거하여 유효 제거 반감기의 함수로 영구이주를 위한 측정시점에서의 지표면 선량율을 나타냈다. 방사성물질의 제거 반감기가 약 4년인 경우, 두 가지 조건 (Condition 1 : 일생동안 누적선량에 근거한 경우, Condition 2 : 월간 선량율에 근거한 경우)에 대해 영구이주를 위한 측정시점에서의 지표면 선량율의 발단치가 거의 같다. 이는 방사성물질의 제거 반감기가 4년 이하의 경우에는 월간 선량율에 근거한 측정시점에서의 지표면 선량율이 보다 보수적, 즉 지표면 선량율에 있어서 보다 낮은 값을 나타내며, 반대로 4년 이상인 경우에는 일생동안 누적선량에 근거한 지표면 선량율이 보다 보수적이라는 것을 나타낸다. 따라서 방사성물질의 유효 제거 반감기를 10년으로 가정할 경우에는 영구이주를 위한 측정시점에서 지표면 선량율의 발단치는 일생동안 누적선량에 근거하여 약 8 µSv/hr, 유효 제거 반감기를 1년으로 가정할 경우에는 월간 선량율에 근거하여 약 56 µSv/hr로 설정될 수 있다.

결론

지표면 선량율에 근거하여 원자력시설의 사고시 주민의 이주를 위한 유도개입준위 산정의 보다 실용적 방법론을 고안하였다. 이주를 요하는 기간에 따라 잠정이주와 영구이주로 구분하여 환경특성 변수 값에 따른 유도개입준위의 영향을 고찰하였다.

이주를 위한 유도개입준위는 침적후 방사성물질의 유효 제거 반감기, 측정 지연시간, 피폭자의 거주위치 등에 따라 뚜렷이 다르게 나타났다. 특히 원자력발전소의 사고와 같이 다양한 핵분열 생성물이 환경에 누출되어 지표에 침적되는 경우, 침적후 수 개월까지는 지표면 선량율이 지수함수 형태보다는 멱함수 형태의 감소를 보이는 것으로 보고되고 있으며 이 경우 측정 지연시간은 유도개입준위 설정에 있어 중요한 요소로 작용한다는 것을 알 수 있다. 방사성물질의 유효 제거반감기가 길수록, 측정 지연시간이 늦어질수록 그리고 피폭자의 오염지역 노출시간이 길수록 유도개입준위는 보다 낮은 값을 나타냈다.

본 연구는 원자력시설의 사고후 주민의 이주를 위한 국내 법적 기준치를 설정할 목적이 아니며, 이주를 위한 다양한 정보와 함께 보다 편리하고 효과적인 유도개입준위 설정 방법을 제시하는데 그 의미를 부여하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. P. H. Jensen, *Basis for Nordic Operational Intervention Levels : Methodology for Deriving Operational Intervention Levels*, Riso National Laboratory, Riso-I-1022(EN), Denmark(1996)
2. International Atomic Energy Agency, *Intervention Criteria in a Nuclear or Radiation Emergency*, IAEA Safety Series No. 109(1994)
3. International Commission on Radiological Protection, *Principles for Intervention for Protection of the Public in a Radiological*

- Emergency*, ICRP Publication 63(1993)
4. Commission of the European Communities, *Radiological Protection Criteria for Controlling Doses to the Public in the Event of Accidental Releases of Radioactive Material*, Directorate-General Employment, Social Affairs and Education, Health and Safety Directorate, Luxembourg, revised (1993)
 5. W. L. Ole, *Intervention Principles and Levels in the Event of a Nuclear Accident : Final Report of the Nordic Nuclear Safety Research Project BER-3*, Nordic Council of Ministers, Denmark(1994)
 6. P. H. Jensen, Y. O. Konstantinov and V. F. Demin, *Development and Application of Techniques to Assist in the Establishment of Intervention Levels for the Introduction of Countermeasures in the Event of an Accident*, Joint Study Project-2/Task-3 (1993)
 7. International Advisory Committee, *The International Chernobyl Project : Technical Report - Assessment of Radiological Consequences and Evaluation of Protective Measures*, IAEA(1991)