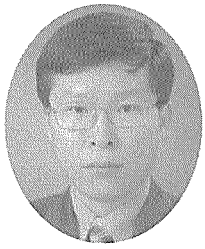
국가 환경방사선 자동감시망의 경보준위 설정기준



이 동 명
한국원자력안전기술원
방사선환경평가실장

1. 서 론

체르노빌 사고 이후 많은 국가들은 자국의 방사능오염사고 뿐만 아니라 인접 국가들의 방사능오염사고에 대비하는 광역의 환경방사선 자동감시망을 갖추고 있다. 우리나라 또한 체르노빌 사고가 환경방사능 감시의 중요성이 재인식되는 계기가 되었으며, 핵실험에 의한 방사능낙진 감시 프로그램에서 원자력 및 방사선사고의 조기탐지 기능을 수행할 수 있는 감시체제로의 일대 전환을 가져오게 된 배경이 되었다.

한국원자력안전기술원은 우리나라 환경방사능 감시 업무를 1987년부터 수행해 오고 있으며, 현재 대전에 위치한 중앙방사능측정소(한국원자력안전기술원내)와 대도시 및 인구밀집지역을 중심으로 한 12개의 지방측정소를 운영 · 관리하고 있다. 한편 한국원자력안전기술원에서는 방사능 이상사태의 조기탐지 기능을 강화하기 위하여 전국 37개소에 가압전리함(pressurized ionization chamber)형의 공간감마선량률계(ambient gamma dose-rate monitor)를 설치하고 이 데이터를 실시간으로 중앙방사능측정소에서 수집 분석할 수 있는 국가 환경방사선 자동감시망(IERNet, Integrated Environmental Radiation Monitoring Network)을 구축 · 운영하고 있다.

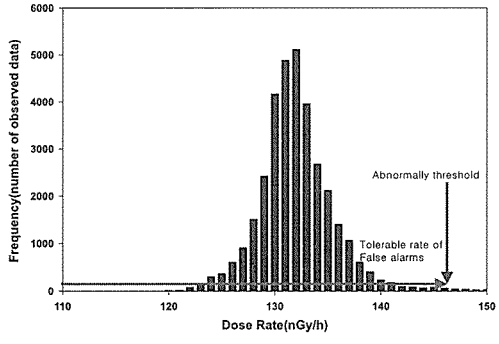
이 감시망은 공간감마선량률의 변동을 매시간 감시하여 어떤 기준값(reference level) 이상일 경우 그 원인 규명을 통하여 방사선 이상 유무를 신속히 판단하고 적절하게 대응할 수 있게 하는 초병의 역할을 하는 시스템이다. 방사선 이상유무의 판단이 되는 환경에서의 공간감마선량률은 시간적, 공간적으로 변하는 자연방사선 준위 특성 때문에 그 기준값을 설정하기가 대단히 어려우며, 설령 이 기준값이 결정되었다 할지라도 방사선 이상유무를 이진법의 논리(true or false)로 판단할 수는 없는 것이다.

따라서 단계별 경보준위의 설정을 통하여 감시기능을 한층 더 강화하고 신속히 담당자 및 전문가에게 통보해줄 수 있는 기준값은 반드시 필요하다고 판단된다. 이러한 측면

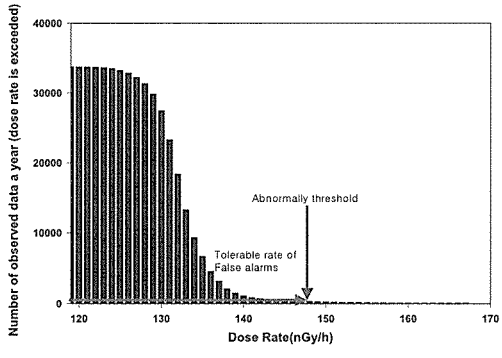
에서 영국의 공간감마선량률의 이상치 판별(abnormal thresholds) 프로토콜, 스웨덴의 경보준위 기준(alarm criterion), 일본의 환경방사선준위 평상 변동폭의 결정 등 각국의 동향을 분석하고, 현재 한국원자력안전기술원이 운영하고 있는 국가 환경방사선 자동감시망의 단계별 경보준위 설정의 기준을 제시하였다. 물론 이 기준은 우리나라의 환경적 특성을 충분히 반영하여야 할 뿐만 아니라 사회적 수용성도 고려의 대상이 될 수 있다. 따라서 여기에서 제시하는 기준은 하나의 방안임을 먼저 밝혀두고자 한다.

2. 영국의 이상치(abnormal data) 판별을 위한 프로토콜

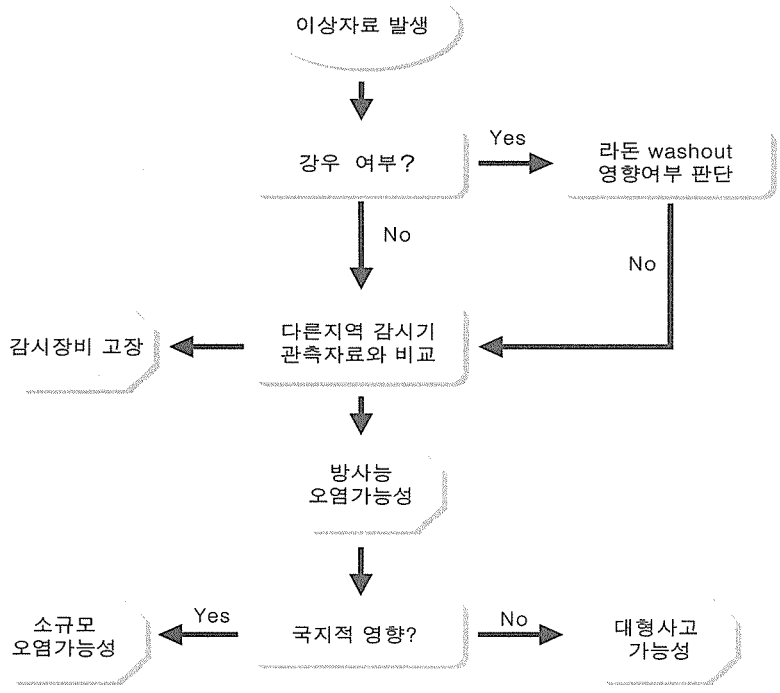
체르노빌 사고 후에 영국정부는 원자력 및 방사선 사고를 탐지하기 위하여 환경방사선 준위를 감시하는 환경방사선 자동감시망(RIMNET, Radioactive Incident Monitoring Network)을 구축하였다. 이 감시망은 미리 정해진 기준준위와 실제 측정한 공간감마선량률을 비교해서 기준준위를 초과하면 경보가 발생됨과 동시에 데이터의 수집빈도를 매 5분마다 1회 수집하는 정도까지 단축할 수 있도록 설계되어 있다. 이 감시망의 방사선검출기는 보상형 GM검출기이다. 영국 국가방사선방호위원회(NRPB)에서 공간감마선량률의 이상치 판별을 위해서 제시한 프로토콜은 다음과 같다. 즉, 1) 환경방사선 백그라운드 준위에 대한 그 지역 고유의 변동은 적어도 1년 동안 한 지점에서 모니터링 한 데이터를 가지고 결정해야 한다. 2) 이러한 기간동안에 걸쳐 관측된 측정값을 통계 처리하여 빈도분포 곡선을 〈그림 1〉과 같이 그래프로 나타낸다. 또는 이것을 이용하여 〈그림 2〉에서 보는 것처럼 누적분포로 나타낼 수도 있다. 3) 자연적인 요인(강우 등)에 의한 선량률 증가로 생긴 경보를 허위경보(false alarm)라고 한다면 실제 원자력 및 방사선 사고와 같은 요인에 의해서 선량률이 증가하였다면 이것은 실제 방사능 비상사태 경보(true alarm)가 된다. 따라서 1년간 허위경보의 허용율(acceptable rates)을 얼마로 할 것인가를 독립적으로 정하여야 한다. 예를 들면 년간 35,040개(15분 data)의



〈그림 1〉 빈도분포(frequency distribution)



〈그림 2〉 누적분포(cumulative distribution)



〈그림 3〉 원인규명을 위한 절차도

데이터 중에서 97%를 허용한다면 나머지 1,051개(3%)에 대해서는 원인 규명이 되어야 한다. 4) 허용율이 정해지면 이러한 우리가 용인할 수 있는 허위 경보율이 빈도분포 곡선상에 표시가 가능하고 이때 X-축의 선량률이 이상치 판별기준이 된다. 또 다른 방법으로는 누적분포곡선으로부터 구할 수 있다.

주로 이러한 이상치 기준을 초과하게 되는 원인으로서는 (a) 대기중 라돈 딸핵종들의 씻김 영향(radon washout due to rainfall), (b) 검출기 또는 시스템 고장(detector or system fault), (c) 국소적인 방사선원의 존재(localized source of radiation), (d) 원자력 및 방사선사고(nuclear or other radiation accident) 등이 있다. 참고로 영국 NRPB의 이상치 원인규명을 위한 절차는 〈그림 3〉과 같다.

3. 스웨덴의 경보준위 기준(alarm criterion)

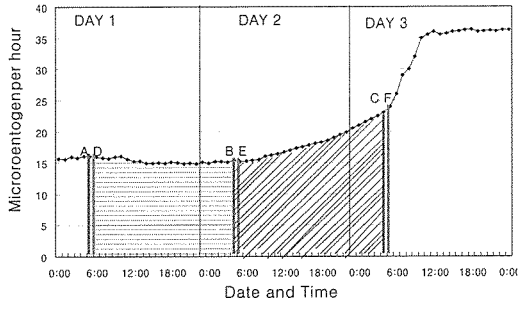
1957년부터 스웨덴 정부는 전국에 25개의 환경방사선 감시기를 설치하여 운영하고 있다. 방사선검출기는 80 l 체적의 가압전리함이며 지표면에서부터 2.5 m의 위치에 설치되어 있다. 전리함방식의 환경방사선감시기는 핵종 구분이 불가능하고, 따라서 방사

선준위의 증가가 자연적인 요인(강우 등)에 의한 것인지 아닌지를 직접 판단할 수 있는 확실한 방법이 없다. 잘 알려져 있는 바와 같이 선량률의 일시적인 증가는 강우 혹은 대기압의 변화에 의해서 일반적으로 일어나는데 감마핵종인 라돈딸핵종(Pb-214, Bi-214 등)이 주로 기여한다. 라돈딸핵종에 의한 선량률 피이크(dose-rate peak)는, 비록 선량률 증가가 상당하다 할지라도, 선량(dose) 그 자체에 기여하는 양은 무시할 수 있는 정도이다. 왜냐하면 라돈딸핵종의 반감기가 매우 짧고 그리고 선량률 피이크의 지속시간이 12시간 이하이기 때문이다.

만약 경보준위를 선량률(dose-rate) 증가가 아니라 선량(dose) 증가를 가지고 설정한다면 실제 방사능사고 상황의 존재여부를 보다 더 확실하게 할 수 있다. 다시 말해서 선량초과분을 특정기간 동안의 선량 차이(dose difference)로 계산할 수 있는데 그 식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\triangle H^*(t) = \int_{t-T}^{t} \dot{H}^*(t) \cdot dt - \int_{t-2T}^{t-T} \dot{H}^*(t) \cdot dt$$

여기서 T는 선량을 합산한 특정기간(예를 들면 24시간)이다. 그리고 $H^*(t)$는 선량(*dose*)이고, $\dot{H}^*(t)$는 선량률(*dose-rate*)이다. 만약 L이 T시간 동안의 선량으로 나타낸 경보준위라고 한다면 경보에 대한 기준(criterion)은 $\triangle H^*(t) > L$이 된다. 〈그림 4〉를 통하여 좀 더 구체적으로 설명하면 다음과 같다. 즉, 3일째 되는 날(t=C) 05:00시를 기준으로 해서 24시간 뒤로 거슬러 B점까지 적분을 하고, A와 B사이에 대해서 적분하여 빼준 값이 경보준위 L을 초과했다면 05:00시에 경보를 발생한다. 만약 경보준위가 더 높은 선량으로 설정되어 있다면 〈그림 4〉의 3일째 되는 날(t=F) 06:00시를 기준으로 해서 24시간 뒤로 거슬러 E점까지 적분을 하고, D와 E사이에 대해서 적분하여 빼준 값이 경보준위 L을 초과했다면 06:00시에 경보를 발생한다.



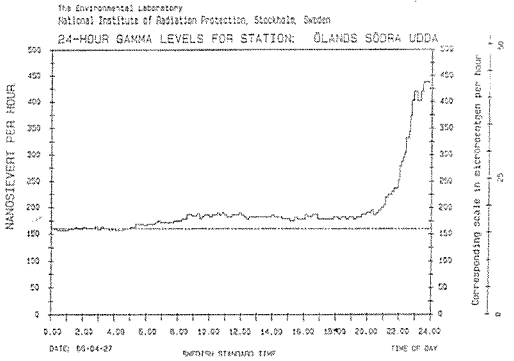
〈그림 4〉 누적선량(24시간)의 예(빗금친 부분)

이러한 경보준위 설정 알고리즘의 적합성

〈표 1〉 스웨덴 각 지방측정소의 경보발생 일시(모의계산 결과)

지역(스웨덴)	경보발생 일시(1986년 4월)		
	L=100nSv	L=200nSv	L=300nSv
UDDE(남부의 섬)	4월 27일 11:34	4월 27일 16:03	4월 27일 20:31
EKSJO(남부)	4월 27일 15:57	4월 27일 19:46	4월 27일 22:22
STOCKHOLM(중남부)	4월 27일 21:33	4월 27일 23:52	4월 28일 02:09
ERKEN(중남부)	4월 27일 23:13	4월 28일 03:19	4월 28일 06:45
UMEA(북부)	4월 29일 00:54	4월 29일 01:13	4월 29일 01:31

을 체르노빌 사고시 스웨덴에서 관측된 데이터를 이용하여 모의 계산하였다. 예를 들면 T=24 시간, L=100 nSv(약 10 μR), 200 nSv(약 20 μR), 300 nSv(약 30 μR)으로 했을 때, 최초 경보가 발생한 시간은 각각 아래 〈표 1〉과 같다.



〈그림 5〉 스웨덴 UDDA 방사선측정소에서 관측된 체르노빌 사고의 영향

UDDE 섬에서의 측정자료를 분석해보면 '86년 4월 27일 05:00시와 06:00사이에 선량률이 증가하기 시작하였다. 평상시 평균 약 16 μR/h였는데 1차 alarm(L=100 nSv)이 울린 11:30분경에는 18 μR/h이상이 지속된 것으로 보고 되었다.

참고로 자연현상에 의한 선량률 변동에 대한 평가를 위해서 체르노빌사고 이전에 수집된 데이터를 가지고 위의 식에 적용하였다. 즉, 백그라운드 방사선의 변동에 기인한 선량초과분(dose excess)에 대해서 평가하였다. 그 결과 비가 온 특정한 날 강우에 기인한 선량초과분은 최대 210 nSv까지 증가한 것으로 나타났다. 따라서 경보준위 L=200 nSv로 설정되어 있었다면 비가 온 그 날은 경보가 발생했을 것이다. 결론적으로, 위에서 정의한 것처럼 선량초과분에 근거한 경보준위의 설정이 선량률 준위에 근거한 경보준위설정보다 실제 방사능오염 상황의 존재여부를 식별하는 보다 더 확실한 방법임을 알 수 있다. 그리고 자연방사선의 계절적 변동에 기인한 경보준위의 수동적인 조절이 불필요함과 아울러 라돈딸핵종에 의해서 발생(trigger)되는 불필요한 허위경보를 최대한 줄일 수 있을 뿐만 아니라 상당히 낮은 준위까지 신뢰성 있는 경보준위를 설정할 수 있다.

4. 일본의 환경방사선준위 평상 변동폭의 결정

일본의 환경방사선 감시기는 주로 원자력 시설주변에 밀집되어 있으며, 각 현에서 운영하고 있다. NaI(Tl) 검출기형의 감시기와 전리함방식의 감시기를 각각 1대씩 지상 1~4 m 높이에 설치하여 매 10분마다 데이터를 수집하고 있다. 통계처리의 방법은 각 현별로 약간씩 차이가 있는데 대부분 현에서는 우주선 기여분(28 nGy/h)을 가산하지 않는 반면에 일부 현에서는 가산해서 최소, 최대, 평균, 표준편차를 구하기도 한다. 미국 TMI사고 이후 일본은 4 기압(또는 8 기압)의 Ar기체를 충진한 14l용량의 가압전리함 방식의 감시기를 추가로 설치하여 측정하고 있다.

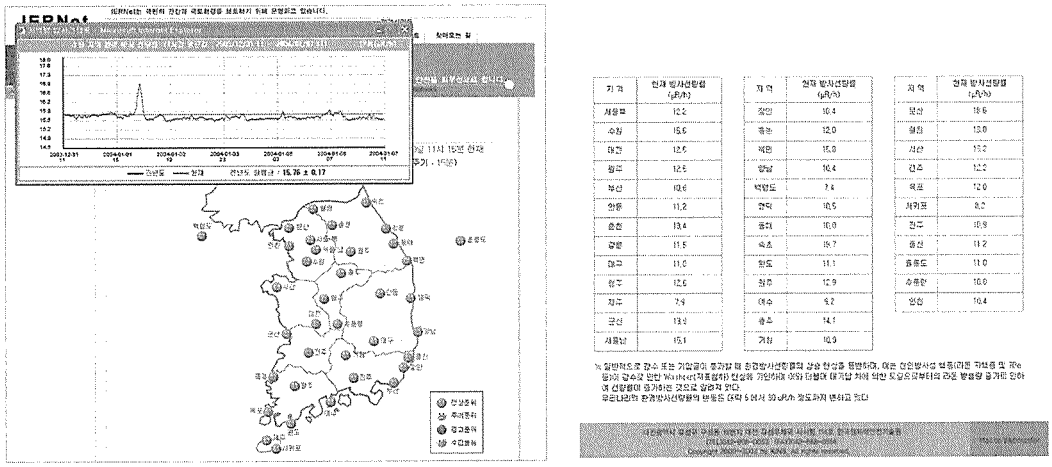
일본의 평상변동폭 결정은 우선 그 지역 환경방사선 연속감시기로부터 시계열(time series)적으로 많은 측정값을 얻은 후 이것을 통계처리해서 그 결과가 정규분포를 나타낸다면 "평균치±3×표준편차"를 평상변동폭으로 하고 있다. 참고로 통계처리해서 얻어진 결과에는 정규분포 외에 대수정규분포 등이 있다. 대수정규분포의 경우에는 평상

변동폭은 평균치±(표준편차)로서 나타내고, 이 경우 평균치는 기하학적 평균치이고, 표준편차는 기하학적 표준편차이다. 이 평상변동폭 자체는 유효선량의 추정 및 평가에 직접적으로 관련되는 것은 아니지만 다수의 연속감시 자료를 이용해서 평상시의 변동폭을 벗어나는 측정자료에 대해서는 원인조사의 필요성 판단 등에 매우 유효한 방법이다. 측정결과가 평상변동폭을 벗어나는 경우에는 다음과 같은 항목에 대해서 조사를 실시하여 원인을 규명하고 원자력시설로부터의 기여 유무를 판단한다. 즉, a) 측정시스템 및 데이터 전송처리 시스템의 건전성, b) 강우 등에 기인된 자연방사선의 증가에 의한 영향, c) 지형, 지질 등 주변환경 조건의 변화, d) 핵실험 등의 요인에 대해서 검토하는데 평상변동폭 보다 낮게 벗어나는 경우에는 적설의 영향 또는 기기의 고장여부를 점검한다.

5. 국가 환경방사선 자동감시망의 단계별 경보준위

우리나라 국가 환경방사선 자동감시망은 아래 〈그림 6〉에서 보는 바와 같이 정상준위, 주의준위, 경고준위의 단계로 구분되어 있으며 통신상의 문제로 인한 데이터의 수집불능 상태도 확인할 수 있다. 현재 단계별 준위 값은 30 μR/h를 기준으로 해서 그 미만이면 정상준위, 그 이상이면 주의준위 단계에 들어가고, 50 μR/h 이상이 되면 경고준위 단계로 되어 있다.

이 단계별 기준값들은 1997년 국가 환경방사선 자동감시망을 구축 · 운영하기 시작한 초창기에 임시적으로 정한 것이다. 이 당시 한국원자력안전기술원에서는 전국토에 대한 공간감마선량률 준위분포 조사를 1996년과 1997년에 걸쳐 전국 약 1,100여 지점에 대해서 수행하였다. 그 결과 다음 〈표 2〉에서 보는 바와 같이 제주도의 최소 2.4



〈그림 6〉 국가 환경방사선 자동감시망 인터넷 홈페이지 화면

〈표 2〉 전국토 공간감마선량률 준위분포 조사결과(단위 : μR/h)구분

구 분	1996년도 조사결과			1997년도 조사결과		
	지점수	범위	평균	지점수	범위	평균
경기도	59	8.8~26.5	18.3	61	7.2~26.3	17.1
강원도	64	6.1~25.1	16.0	121	6.4~36.7	14.7
충남북	60	10.4~23.7	15.7	63	6.1~57.1	15.2
전남	54	9.2~26.2	14.8	60	6.7~14.8	9.6
전북	54	4.0~26.8	14.2	59	9.4~18.9	13.7
경북	62	6.4~16.9	11.4	124	4.8~25.3	10.8
경남	58	6.7~20.2	11.9	62	4.7~21.8	10.1
제주도	53	3.3~16.3	6.7	58	2.4~10.6	6.0
전국	464	3.3~26.8	13.7	608	2.4~57.1	12.3

R/h에서 충청북도의 최대 57.1 R/h까지 공간감마선량률이 지역적인 차이를 보였으나, 대부분 30 R/h이하인 것으로 조사되었다. 이러한 통계에 기초하여 정한 것이 현재 이용되고 있는 30 R/h의 이상준위 기준값의 근거이다. 그러나 이 기준값은 이상치를 조기에 탐지하기에는 너무 큰 여유도를 가지고 있으며 또한 단계별 설정기준 역시 그 근거가 불명확하다 따라서 다음에 설명되는 몇 가지 관점에서 새로 설정하여 수정 제안하고자 한다.

가. 연속감시 데이터에 근거한 경보준위의 설정

전국 37 개소에 설치된 환경방사선감시기로부터 감시 데이터를 매 15 분마다 수집하고 있으며 각 지점마다 축적된 감시 데이터의 수는 통계처리를 위한 충분한 표본이 될 수 있을 정도이다. 또한 2005년도에는 모든 감시기를 설치된 현장에서 비교측정 및 간이 교정 방식을 이용해서 교정하여 감시 데이터의 신뢰성을 확보하였다. 현재 이용되고 있는 경보준위는 전국에 걸친 준위분포에 근거한 것으로 너무 피상적이고 연속감시지점의 지역적, 지질적 특성이 무시된 것이다. 따라서 이제는 감시기가 설치된 지점의 지질적, 지역적 특성이 반영된 경보준위의 설정이 필요하고, 이렇게 함으로서 아주 작은 방사능 오염까지도 조기에 탐지가 가능하게 할 수 있다.

이를 위해서는 감시 데이터의 해석 및 평가방법이 무엇보다도 중요하다. 즉 자연방사선준위는 측정지점의 지질적 특성에 크게 좌우될 뿐만 아니라 여러 가지 환경요인에 의해서 측정할 때마다 그 준위가 다르다. 특히 공간감마선량률의 연속측정시 그 준위는 일일중 시간에 따라, 계절에 따라 특징적 변동양상을 나타내는 것으로 알려져 있다. 이러한 변동 요인으로는 대기중 라돈 딸핵종의 방사능농도, 토양수분, 적설량 등과 같은 환경요인과 강수량, 대기압, 대기습도 등과 같은 기상요인을 들 수 있다. 특히 강우가 평상

〈표 3〉 2004년도 지방측정소의 공간감마선량률 변동

측정소명	공간감마선량률(μR/h)			Data 갯수	
	연평균(m)	최대	최소	〈m+10μR/h	연간
서울	12.3	33.0	10.9	3	35125
춘천	13.7	25.1	12.6	1	35098
대전	12.4	17.2	9.4	0	35113
군산	13.8	18.5	12.2	0	35136
광주	12.4	17.6	11.7	0	35135
대구	10.9	68.9	8.8	27	35029
부산	10.5	15.4	7.7	0	35057
제주	8.1	15.0	7.3	0	35136
강릉	11.8	17.7	9.4	0	34032
안동	11.4	18.1	9.3	0	34911
수원	15.7	20.9	14.5	0	35070
청주	12.7	19.4	9.5	0	35070

시 선량률 변동에 가장 크게 기여하는 것으로 알려져 있으며, 강우에 의한 선량률 상승분은 우리나라의 경우 지역에 따라 약간의 차이는 있지만 대략 3~4 μR/h 정도인 것으로 조사되었다.

〈표 3〉은 2004년도 국가 환경방사선 자동감시망을 통하여 전국 12개 지방측정소의 감시포스트에서 수집된 (수집율 99.72%) 15분 평균 데이터를 이용하여 통계 처리한 것이다. 이 표에서 대구측정소의 변동 폭이 큰 것은 도시가스 인입공사와 관련하여 감시포스트 주변에서 Ir-192선원을 이용한 비파괴검사가 있었기 때문인 것으로 확인되었다. 이와 같이 비정상적인 상황을 조기에 탐지해 내는 것이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다.

나. 보고준위와 이상준위의 관계

과학기술부 고시 제2004-17호 "원자력이용시설 주변의 방사선환경조사 및 방사선환경영향평가에 관한 규정" 제10조(보고)에 의하면 고정지점에서 연속측정중인 공간감마선량률의 1시간 평균치가 최근 3년 이상 자료(그 이하의 경우에는 확보된 자료만)의 평균치보다 10 μR/h를 초과한 경우에는 과학기술부장관에게 보고하도록 되어 있다. 여기서 초과선량률 10 μR/h을 정한 것은 일반인의 연간선량한도인 1 mSv를 시간당 공간감마선량률로 환산하면 대략 10.8 μR/h가 되므로 이를 이용한 것이다. 따라서 우리나라의 보고준위(reporting level)는 영국의 이상치 판별준위, 스웨덴의 경보기준, 일본의 평상변동폭 준위 등과 그 의미가 비슷하다고 할 수 있다. 다시 말해서 선량률 증가 원인이 시설의 영향인지 아니면 자연현상에 의한 것인지를 확인하라는 초기단계의 경보준위를 말한다. 이것은 어떻게 보면 현재 국가 환경방사선자동감시망에서 정상준위와

〈표 4〉 주민보호조치 보조 결정기준

측정량	설정값	보호 조치
방사능구름 통과중 공감감마선량률	0.1mSv/h (≒10mR/h)	안정 옥소제 복용 및 대피 권고
	1mSv/h (≒100mR/h)	소개 또는 대피 권고
지표면 침적에 의한 공간감마선량률	1μSv/h (≒100μR/h)	식품 섭취제한 권고
	0.2 mSv/h (≒20mR/h)	일시이주 권고
	1mSv/h (≒100mR/h)	소개 또는 대피 권고

이상준위의 기준점이다. 이와 같이 보고준위와 이상준위가 같은 의미로 해석됨에도 불구하고 과학기술부 고시의 보고기준은 초과선량률이 10 μR/h 이상일 때로 되어 있고 국가 환경방사선자동감시망의 이상준위는 전국 37개 지점에 대해서 일률적으로 30R/h 이상으로 설정된 것은 모순이다. 따라서 고정지점의 연속감시의 경우 현재 과기부 고시상에 명시한 보고기준이 바로 정상범위의 판별기준이라고 할 수 있으므로 국가 환경방사선자동감시망에서도 이 기준 값이 곧 이상준위가 되어야 한다.

다. 긴급시 주민보호조치 보조 결정기준

우리나라의 국가안전관리 집행계획 중에서 방사능방재대책 계획에 따르면 긴급시 주민보호조치를 위한 보조의 결정기준은 다음 〈표 4〉와 같다. 이 결정기준들은 IAEA (TECDOC-1162) 및 ICRP 82에서 권고하는 값들과 거의 같다.

여기서 가장 낮은 개입의 준위는 식품의 섭취를 제한 권고하는 준위로서 약 100R/h 이다. 따라서 이 준위 이상 지속이 계속되면 정부에서는 적극적인 개입이 필요함으로 방사능 비상사태라고 할 수 있다.

6. 결 론

국가 환경방사선 자동감시망의 경보준위 설정은 우선 방사선 이상사태의 조기탐지라

〈표 5〉 국가 환경방사선 자동감시망의 경보설정에 대한 기준

경보단계	설정값	설정 기준	비고
정상준위(NRL) (Normal Reference Level)	평균값+10μR/h 미만	자연현상 등에 기인한 변동범위	
보고준위(RRL) (Reporting Reference Level)	평균값+10μR/h 이상	연간선량한도1mSv를 환산	원인규명 및 보고
비상준위(ERL) (Emergency Reference Level)	100μR/h 이상	주민보호조치 보조결정 기준	식품섭취 제한권고
운영개입준위(OIL) (Operational Intervention Level)	10mR/h 이상	IAEA/TECDOC-1162 대피 권고	대피 권고

는 임무에 충실하도록 정해져야 하지만 잦은 경보의 발생은 오히려 그 신뢰성을 저하시켜 우리로 하여금 무감각하게 할 수도 있는 양면성이 있다. 따라서 비정상적인 데이터의 원인규명을 위한 보고준위 또는 이상준위와 실제로 일반인들의 비정상적인 피폭을 제한하는데 요구되는 개입(Intervention)준위와는 반드시 구분되어서 정해져야 한다. 이와 같이 어떤 경보준위를 설정함에 있어서 불필요한 선량피폭을 줄일 수 있고, 또한 일반국민들이 안심할 수 있다는 측면에서의 이익(benefits)과 방사선위험도, 사회적 혼란, 공포 그리고 이에 대한 비용측면에서의 위해(harm)가 상존한다. 따라서 어떤 경보준위의 설정은 얻는 것과 잃는 것의 형평이 잘 맞도록 설정하는 것이 원칙이다. 일반국민들의 보호를 위한 그 어떤 조치(action)도 위에서 말한 이익과 위해가 같이 존재한다. 그러나 이익에 좀 더 무게가 실려질 때 조치가 취해져야 한다. 끝으로 새로 제시한 국가 환경방사선 자동감시망의 경보준위 설정기준은 〈표 5〉와 같이 요약할 수 있다. KRIA