

원전주변 방사성물질의 대기확산 평가체제 구축

이 명 찬

한전 전력연구원 방사선안전그룹 책임연구원



원자력 발전은 지구 온난화 방지 등 지구 환경 보전에 지대한 역할을 하고 있으나, 원전 가동에 따른 방사선 영향에 대한 의구심도 상존하고 있다.

따라서 원자력발전소 운영자로서 한국전력공사는 이러한 원전에 대한 막연한 불안 심리를 해소하고 원전 안전성을 확인하기 위한 수단으로 원전 주변 주민의 방사선 영향을 평가하고 있다.

방사성 물질이 인체에 도달되는 과정(대기 중에서의 이동 및 확산, 토양·동식물성 식품 등과 같은 환경 매질에서의 전이 등)이 매우 복잡하

므로, 평가 결과는 어느 정도의 불확실성을 내포하고 있다.

따라서 이러한 불확실성을 줄여 평가의 정확도를 향상시키기 위해 끊임 없이 기술을 개발하고 있다.

일반적으로 방사성 물질의 대기 확산을 평가할 때, 평가 방법론이 내포하고 있는 불가피한 불확실성에 의해 주민의 방사선 영향이 과소 평가되는 것을 방지하기 위해, 가급적 실제보다 과대 평가되도록 보수적인 가정을 사용한 가우시안 대기 확산 평가 모델을 적용하여 왔다.

그러나 이러한 방법론은 방사선 영향을 보수적으로 평가하는 장점이 있는 반면, 원전 주변의 국지적인 대기 순환에 의한 영향을 고려하는 데는 일정한 한계를 지니고 있었다.

90년대 들어 정부에서는 월성 2·3·4호기 및 울진 3·4호기 건설·운영 허가 조건 사항과 과학기술부 고시(안)을 통해 해륙풍 등과 같은 국지적인 대기 순환을 고려하여 보다 정확하고 현실적으로 방사선 영향을

평가하도록 요구하고 있다.

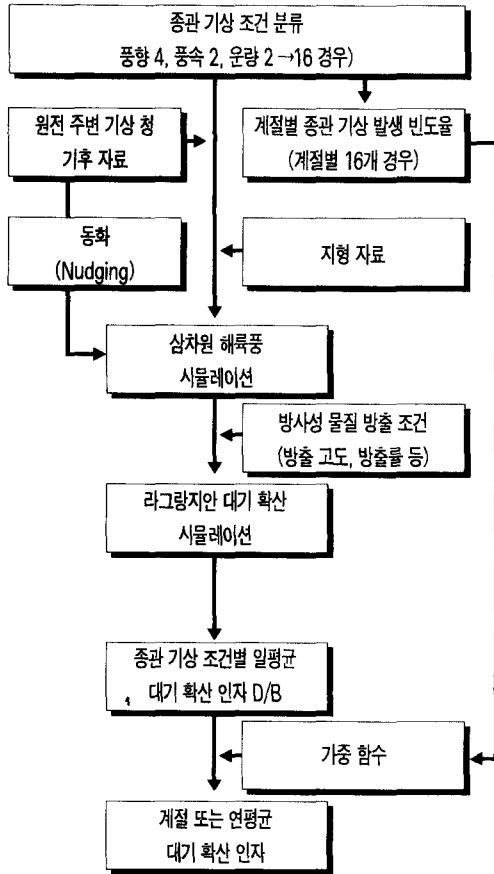
이에 따라 한국전력공사는 월성 원전을 대상으로 삼차원 라그랑지안 대기 확산 평가 방법론을 개발하여 국지적인 기상 특성을 고려하여 방사선 영향을 평가할 수 있는 체제를 구축하였다.

정상 운전시 대기 확산 평가 체제

삼차원 수치 모델은 다양한 물리적 현상을 보다 정확하게 재현할 수 있는 장점이 있는 반면, 수치 계산에 많은 시간이 소요된다.

세계적으로 삼차원 대기 확산 평가 방법에 대한 많은 연구 개발이 있었으나, 산업 시설의 환경 영향 평가 현업에 잘 이용되지 않고 있는 것도 이러한 수치 계산 시간의 과다 때문이다.

따라서 원전 주변의 국지 대기 순환을 고려한 방사성 물질의 대기 확산 평가 체제를 개발하기 위해서는 수치 계산 시간을 단축시킬 수 있는



〈그림 1〉 방사성 물질의 계절별 또는 연평균 대기 확산 인자 계산을 위한 라그랑지안 대기 확산 평가 체계

방법론이 도입되어야 한다.

수치 계산 시간에 대한 제약을 해결하기 위해, 해륙풍과 같은 국지 대기 순환은 우리 나라 전체적인 기상 현상, 즉 종관 규모의 기상 상태에 따라 일정한 패턴을 나타내고 있다는 점에 착안하여 과거의 기후 자료를 이용하여 종관 기상 조건별로 대기 확산 특성에 대한 데이터 베이스를 구축하고, 그 데이터 베이스를 이용

하여 부지 주변의 국지적인 대기 순환을 반영할 수 있는 대기 확산 평가 체계를 개발하였다(그림 1).

종관 규모의 기상 상태가 바람이 강하거나 구름이 많은 흐린 날에는 육지와 해양의 온도 경도가 형성되지 못하여 해륙풍 발생이 억제된다.

또한 종관 바람의 풍향이 해안선과 이루는 각도가 해륙풍 발달에 영향을 준다.

종관 바람의 풍향이 해안선의 큰 각을 이루면 해양·육지간의 온도 이류로 온도 경도가 강화되어 해륙풍 발달을 촉진시킨다.

따라서 종관 기상 상태는 계절별로 850hPa의 지균풍을 풍향 4방위(북풍 : 315°~45°, 동풍 : 45°~135°, 남풍 : 135°~225°, 서풍 : 225°~315°), 그리고 풍속 2등급(지균풍속 < 5m/s, 지균풍속 ≥ 5m/s)으로 8가지의 경우로 분류한 다음, 부지 지역의 일평균 운량을 2 가지 경우(운량 < 5/10, 운량 ≥ 5/10)로 더 나누어 모두 16가지 경우로 분류하였다.

계절별로 분류된 각 종관 기상 조건에 대해 삼차원 해륙풍 모델로 부지 주변의 바람·온도 등의 기상장을 계산하고, 그 결과를 입력 자료로 라그랑지안 입자 확산 시뮬레이션을 수행하여 계절별로 각 종관 기상 조건에 대해 일평균 대기 확산 인자 데이터 베이스를 구축하였다.

따라서 특정 연도의 계절 또는 연평균 대기 확산 인자를 계산하고자 할 경우에는 구축된 데이터 베이스의 종관 기상 조건별 일평균 대기 확산 인자에 특정 연도의 해당 종관 기상 상태의 계절 또는 연간 발생일 빈도를 곱하여 가중 평균하여 계산하면 된다.

국지 대기 순환 데이터 베이스는 두 단계의 삼차원 해륙풍 시뮬레이션 과정을 거쳐 구축하였다.

먼저 경계 조건의 영향을 최소화하기 위해 한반도 전역을 대상으로 하는 격자 간격 15km의 광역의 성긴 격자계(46×46 격자망) 영역에 대해 시뮬레이션을 수행한 후, 그 결과를 경계 조건으로 하여 월성 원전 주변 지역의 격자 간격 3km의 미세 격자계(31×46 격자망) 영역에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

또한 시뮬레이션 결과의 정확도를 높이기 위해 과거 5년간 관측된 기상 자료를 이용하여 계산 결과를 동화(nudging)하였다.

모델에 사용된 방정식계는 운동 방정식, 정역학 방정식, 열역학 방정식, 비습 방정식, 연속 방정식, 그리고 토양층 열속 방정식으로 구성하였으며, 좌표계는 지형 의존(terrain-following) 연직 좌표계(x, y, z, t)를 사용하였다.

모델의 초기 기상 조건 및 동화 자료는 지난 5년간(90~94년)의 기상청 관측소 및 부지 기상탑 관측 자료를 해당 종관 기상 조건별로 분류하여 시간대별로 평균하고, 각 격자점으로 객관 분석하여 사용하였다.

방사성 물질의 계절별 각 종관 기상 조건에 대한 일평균 대기 확산 인자 데이터 베이스는 라그랑지안 입자 확산 모델을 이용하여 구축하였다.

이 방법은 연속적으로 배출되는 방사성 물질 입자들을 시간에 따라 계속적으로 추적하여 원하는 시각에서의 각 입자들의 위치를 결정하여 농

도 분포를 계산하는 것으로 개별 입자 위치는 다음과 같이 결정된다.

$$X_i(t + \Delta t) = X_i(t) + (\bar{U}_i + u_i') \Delta t$$

여기서 X_i 는 한 입자의 좌표계상에서의 공간상 위치를 나타내고, \bar{U}_i 는 입자가 위치한 곳에서의 평균적인 바람성분을, u_i' 는 입자가 위치한 지점의 난류 성분을, 그리고 Δt 는 시간 변화 즉 적분 시간 간격을, i 는 좌표계의 x, y, z 성분을 나타낸다.

평균적인 바람 성분 \bar{U}_i 는 삼차원 미세 격자계 해륙풍 모델로 얻어지는 i 성분의 바람이고, 난류 성분 u_i' 는 Markov 과정을 이용하여 매개 변수화할 수 있다.

어느 주어진 시간의 대기 확산 인자는 배출 입자의 수가 작아도 적용할 수 있는 kernel density 방법으로 농도를 계산하였다.

입자 방출은 발전소의 10m 고도에서 1분에 한 개씩의 가상 입자가 연속적으로 방출된다고 가정하였으며, 일주기적 해륙풍 순환의 영향을 알아보기 위해 먼저 가상 입자를 06시부터 24시간 동안 연속 방출시켜 평형 상태에 도달시킨 후, 이 때의 방사성 입자의 분포를 초기 조건으로 삼아 06시부터 다시 1분에 한 개씩 가상 입자를 방출시키면서 대기 확산 모델링을 수행하였다.

농도 계산의 단순화를 위해 모델 수행시 입자의 방사성 붕괴와 지표면 침적은 일어나지 않는다고 가정하였으며, 방사성 붕괴 및 지표면 침적은

일평균 대기 확산 인자 계산후 핵종별로 방사성 붕괴 상수와 상대 침적률을 고려하여 다시 계산하였다.

사고시 대기 확산 평가 체계

삼차원 라그랑지안 대기 확산 평가 모델을 이용하여 사고시 방사선 비상 대응 체계를 구축하였다.

정상 운전의 경우에는 계절 또는 연평균적인 대기 확산 인자 분포를 계산하기 때문에 종관 기상 조건별로 일평균 대기 확산 인자 데이터 베이스를 구축하여 이를 이용하였으나, 사고시에는 사고 시간대에 따라 대기 확산 인자의 분포가 다르게 나타나기 때문에 일평균 대기 확산 인자 데이터 베이스를 이용할 수 없다.

따라서 삼차원 라그랑지안 대기 확산 시뮬레이션을 실시간으로 수행하여야 하기 때문에 신속한 수치 계산 능력을 가진 컴퓨터가 필요하다.

따라서 PC에서는 자료 입·출력 및 프로그램 제어를 수행하고, 계산 시간이 빠른 워크스테이션에서는 해륙풍 데이터 베이스를 이용하여 기상 입력 자료를 결정하고 라그랑지안 대기 확산 시뮬레이션을 수행하도록 평가 체계를 구축하였다.

워크스테이션을 이용할 경우에는 PC와 워크스테이션 간의 자료 송수신을 위한 네트워크가 구비되어야 한다.

그러나 네트워크가 가능하지 않을

경우가 발생할 수 있기 때문에 이를 대비하여 예비적으로 PC에서 대기 확산 인자를 계산할 수 있도록 가우시안 대기 확산 시뮬레이션을 사용자 선택에 의해 수행할 수 있게 하였다(그림 2).

대기 확산 평가 모델의 정확도 추정

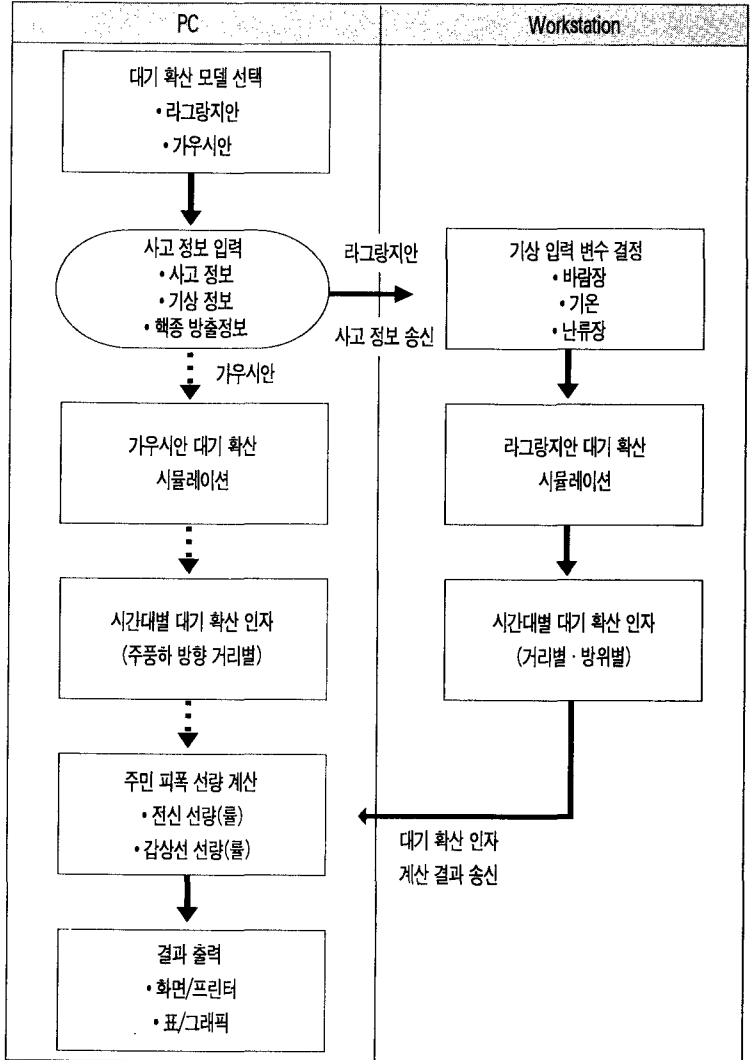
96년도 월성 원전 환경 방사능 조사 보고서의 주민 피폭 선량 평가 결과에 의하면, 기체 방사성 물질에 의한 성인의 연간 전신 선량 0.0023 mSv(이는 설계 제한치 0.05mSv의 4.6 %에 불과한 값임)의 약 67%가 삼중 수소에 의한 것으로, 주민 피폭 선량 평가의 정확도는 환경 매질 중 삼중 수소 농도 추정에 달려 있다고 해도 과언이 아니다.

따라서 월성 원전 주변 지역의 삼중 수소 농도 측정값을 이용하여 정상 운전시 삼차원 라그랑지안 대기 확산 평가 모델의 정확도를 추정하였다.

월성 원전에서는 주변 10개 지역에서 월 2회 주기적으로 공기 중 삼중 수소 농도를 측정하고 있다.

측정 지점 중 발전소 내에 위치한 곳을 제외한 8개 지점(표 1)에 대해 96년도 자료를 이용하여 연평균 공기 중 삼중 수소 농도 계산값과 측정값을 비교하였다(그림 3).

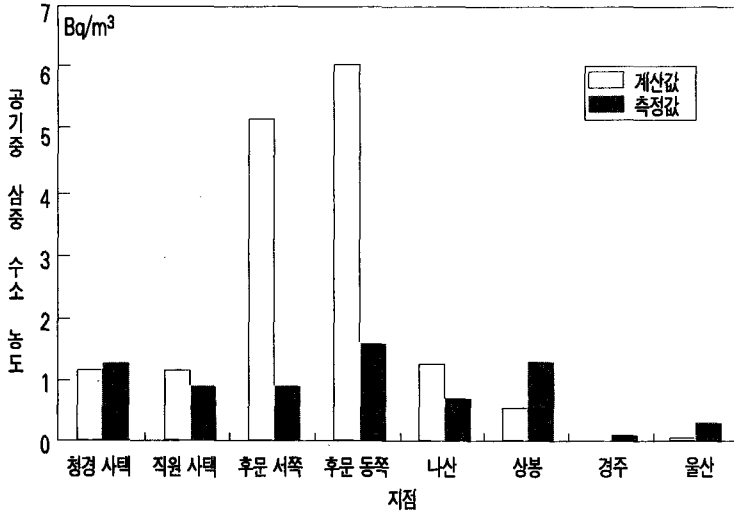
공기 중 삼중 수소의 농도(Bq/m³)는 라그랑지안 대기 확산 평가 모델



(그림 2) 사고시 라그랑지안 대기 확산 평가 체제를 이용한 주민 피폭 선량 계산 절차

(표 1) 월성 원전 주변 공기 중 삼중 수소 농도 비교 지점

지점	청경 사택	직원 사택	후문 동쪽	후문 서쪽	상봉	나산	경주	울산
방향	N	SSW	SSE	SSW	NNE	W	NW	SSW
거리	1.0km	2.0km	0.8km	0.8km	2.0km	1.7km	22.3km	23.6km



〈그림 3〉 라그랑지안 대기 확산 평가 모델로 구한 월성 원전 주변 공기 중 삼중 수소 농도와 측정값의 비교

로 구한 연평균 대기 확산 인자 (s/m^3)의 값에 월성 원전의 96년도 연평균 삼중 수소 방출률(Bq/s)을 곱하여 계산하였다.

〈그림 3〉을 보면, 직원 사택과 청정 사택 지역은 계산값과 측정값이 거의 일치하는 결과를 보여주고 있다.

그러나 후문 동쪽과 후문 서쪽의 결과는 계산값이 측정값보다 약 4~6 배 정도 크게 나타나고 있다.

또한 부지로부터 20km 이상 떨어져 있는 경주와 울산 지역에서는, 절대값이 매우 낮아 비교가 힘들지만 측정값에 비해 낮게 계산됨을 알 수 있다.

그러나 전반적으로는 계산값이 실측치를 기준으로 수배 이내의 오차 한계를 갖는 것으로 나타났다.

이러한 비교 결과로 보아 일반적으로 공기 중 삼중 수소 농도 추정 모델

의 오차 범위가 수 배~수백 배의 분포를 보이고 있음을 감안하면, 한국 전력공사에서 개발한 삼차원 라그랑지안 대기 확산 평가 모델의 정확도가 매우 높은 것을 알 수 있다.

또한 한국원자력연구소에서 정부 원자력 중장기 연구 과제 「방사선 실시간 해석 체제 개발」의 일환으로 울진 원자력발전소 부지에서 실시한 대기 확산 실험 자료를 이용하여 사고시 대기 확산 평가 모델의 정확도를 추정하였다.

대기 확산 실험은 97년 5월 27일에 11시 30분부터 13시까지 약 1시간 30분 동안 수행하였으며, 발전소 방출구 높이인 58m 고도에서 SF_6 를 시간당 181.43kg을 방출하면서 10분 간격으로 공기 시료를 수집하여 SF_6 농도를 분석하였다.

삼차원 라그랑지안 대기 확산 시뮬레이션은 실험 조건과 동일한 기상 조건과 입자 방출 조건을 가지고 수행하였다.

실험값과 라그랑지안 대기 확산 평가 모델로 구한 계산값을 비교한 결과, 초기에는 실험값이 약 1.3~1.5배 정도 높게 나타났으나, 시간이 경과함에 따라 오차가 점점 줄어들어 13시에는 거의 같은 농도 분포를 보여 주었다.

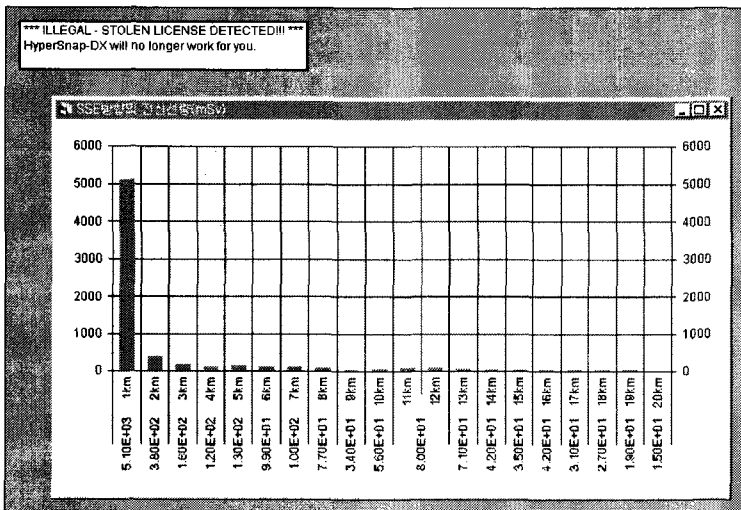
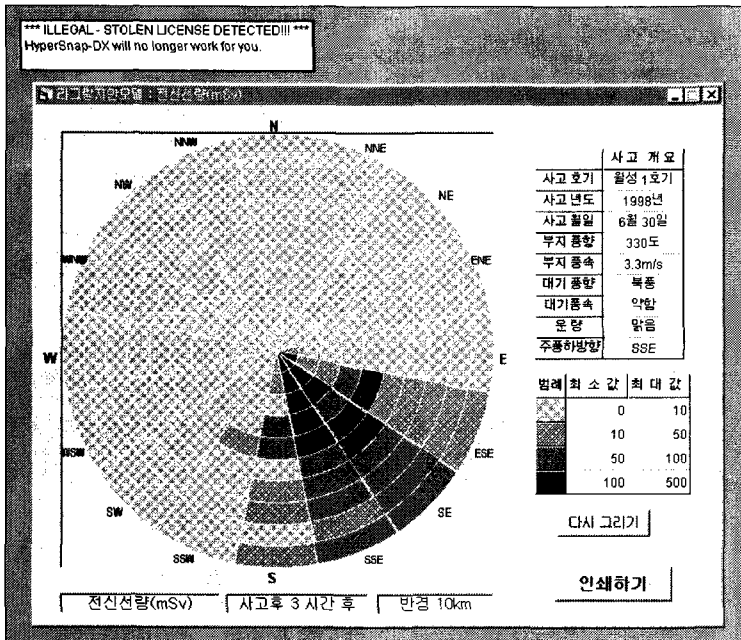
최대값이 나타나는 방위는 최대 약 30도 정도의 방위차가 있었으나, 이는 방사선 비상 대응시 최대값이 나타나는 방위를 중심으로 좌우 60도 범위의 지역에 거주하는 주민을 모두 대피 또는 소개시키고 있음을 감안하면, 본 대기확산 평가 체제를 방사선 비상 대응 현업에 적용할 수 있는 신뢰도 및 정확도를 충분히 확보하였다고 생각된다.

주민 피폭 선량 평가 전산 프로그램

개발된 삼차원 대기 확산 평가 체제를 적용하여 정상 운전시 및 사고시 원전 주변 주민 피폭 선량 평가 전산 프로그램을 구축하였다.

대기 확산 및 피폭 선량 평가 등의 단위 프로그램들은 Fortran으로 작성하고, 단위 프로그램을 윈도95 환경에서 구현시키는 통합 프로그램은 마이크로소프트 Visual Basic 4.0으로 작성하였다.

따라서 각종 자료의 입력, 프로그



(그림 4) 사고시 비상 대응을 위한 주민 피폭 선량 평가 전산 프로그램의 선량 평가 결과 출력 화면. 방위·거리별 피폭 선량(위), 주풍하 방향에 대한 거리별 피폭 선량(아래)

램 실행 및 결과 출력의 일련의 업무가 Graphic-User Interface 체제에서 수행되어 사용자가 쉽게 전산 프로그램을 운용할 수 있도록 하였다.

본 프로그램을 이용하여 사고시 주민 피폭 선량을 계산하여 그 결과를

그래픽으로 출력한 예를 <그림 4>에 제시하였다.

결론

원자력 발전은 에너지 경제성뿐만

아니라 지구 온난화 방지 등과 같은 지구 환경 보전 차원에서도 그 중요성이 점차 대두되고 있으나, 방사선에 대한 막연한 심리적 불안감으로 일반 대중의 오해가 함께 공존하고 있는 것도 사실이다.

한국전력공사에서는 이러한 불안감을 해소하기 위해 체계적으로 원자력발전소 주변의 환경 방사선(능)을 감시하고 있으며, 또한 동시대의 가장 진보한 기법을 적용하여 주민의 방사선 영향을 평가하고자 관련 기술을 끊임없이 개발하고 있다.

이러한 노력의 일환으로 보다 정확하게 방사성 물질의 대기 확산을 평가하고자 원전 주변의 국지적인 기상 현상으로 고려할 수 있는 삼차원 라그랑지안 대기 확산 평가 체계를 개발하였다.

개발된 방법론에 대해 월성 원전 주변 지역에서 측정된 공기 중 삼중수소 농도와 울진 부지에 실시한 대기 확산 실험 자료를 이용하여 정확도를 추정하였다.

정상 운전시 및 사고시 모두 실측값에 대해 수 배 이내의 오차 범위를 갖는 매우 정확한 추정 결과를 보여 주었다.

따라서 본 평가 체제 개발로 원전에 의한 방사선 영향 평가의 정확도를 한층 제고시킬 것으로 기대되며, 또한 원전의 안전성에 대한 막연한 불안감 해소에도 일조할 것으로 예상된다.