

월성원전 부지 주변의 해륙풍을 고려한 방사성 물질의 대기확산 모델링

이갑복, 이명찬, 송명재

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

우리나라 원전이 위치하고 있는 해안지역에서 빈번히 발생하는 해륙풍 등과 같은 국지순환을 고려할 수 있는 삼차원 라그랑지 입자확산모델을 개발하였다. 개발된 모델을 이용하여 월성원전 부지를 대상으로 봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날에 대해 방사성 물질의 대기확산을 모델링하였다. 모델링 결과를 통해 해륙풍에 의한 방사성 입자의 시·공간적 분포와 일주기적 확산 양태를 규명하고, 해륙풍의 풍향변화에 의한 방사성 입자의 재순환의 중요성을 확인하였다.

1. 서 론

원전의 환경 안전성을 확인하는 수단으로 우리나라 각 원전에서는 정상운전시 환경중으로 방출되는 극미량의 방사성 물질로 인해 주변주민이 받는 피폭선량을 평가하고 있으며, 또한 사고시 주민 대피 또는 소개 등 주변주민을 방사선으로부터 보호하기 위해 피폭선량을 신속히 예측하는 비상대응체제를 운영하고 있다.

원전에서 대기중으로 방출된 방사성 핵종은 물리·화학적 및 생물학적 이동과정을 거치면서 희석 또는 농축되는 등 매우 복잡한 과정을 통해 환경중에 존재하게 되나, 일차적으로는 바람 또는 강수 등과 같은 기상현상을 매개로 확산 및 이동하기 때문에, 각 환경 매질중의 농도 분포는 대기중 농도분포에 의해 크게 영향을 받는다.

우리나라 원전은 모두 해안지역에 위치하고 있어 방사성 물질의 대기확산은 해안지역에서 빈번히 발생하는 해륙풍의 영향을 받고 있다.

따라서 본 연구에서는 라그랑지 입자확산 모델을 개발하여 월성원전 부지를 대상으로 봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날의 경우에 대해 모델링하여, 해륙풍에 의한 방사성 입자의 시·공간적 분포와 일주기적 확산 양태를 규명하고, 해륙풍의 풍향변화에 의한 방사성 입자의 재순환의 중요성을 확인하였다.

2. 대기확산 모델 및 수행방법

2.1 라그랑지 입자 확산 모델

방사성 물질의 대기확산 예측은 연속적으로 배출되는 방사성 물질 입자들을 시간에 따라 계속적으로 추적하여 원하는 시각에서의 각 입자들의 위치를 결정하여 농도분포를 계산하는 라그랑지 입자확산모델[1]을 사용하였다.

방사성 입자의 위치는 다음과 같이 결정된다.

$$X_i(t + \Delta t) = X_i(t) + (\overline{U}_i + u_i') \Delta t \text{ ----- (1)}$$

여기서 X_i 는 한 입자의 좌표계상에서의 공간상 위치를 나타내고, \overline{U}_i 는 입자가 위치한 곳에서의 종관바람과 증규모 바람을 합한 바람성분을, u_i' 는 입자가 위치한 지점의 난류성분을, 그리고 Δt 는 시간변화 즉 적분시간간격을, i 는 좌표계의 x, y, z 성분을 나타낸다. 종관 및 증규모 바람성분 \overline{U}_i 는 삼차원 미세 격자계 해륙풍 모델로 얻어지는 i 성분의 바람이고, 난류성분 u_i' 는 Markov 과정을 이용하여 다음과 같이 매개변수화할 수 있다.

$$u_i'(t + \Delta t) = R_{L,i}(\Delta t)u_i'(t) + (1 - R_{L,i}(\Delta t))^{1/2}u_i''(t) + \delta_{i,3}(1 - R_{L,3}(\Delta t))w_d \text{ -- (2)}$$

식(2)에서 $R_{L,i}$ 는 i 바람성분의 라그랑지 자기상관함수로 해륙풍 모델로부터 얻어지는 바람장의 분산과 대기안정도 지수인 Monin-Obukhov 길이 스케일로 부터 매개변수화할 수 있다[2]. u_i'' 는 i 성분의 무작위 바람성분, $\delta_{i,j}$ 는 Kronecker delta이고, w_d 는 표류 연직 바람성분의 보정값으로 입자들이 연직방향으로는 정규분포를 하지 않고 난류에너지가 적은 쪽으로 왜도(skewness)되는 경향을 보정해주는 인자이다[3].

2. 2 대기확산인자 계산

어느 주어진 시간의 오염농도는 격자체적내에 존재하는 입자들의 수를 계산하여 결정해야 하나, 정확한 농도를 계산하기 위해서는 가능한 많은 입자들을 배출하여야 하는 어려움이 있기 때문에 배출입자의 수가 작아도 적용할 수 있는 kernel density 방법[4]으로 농도를 계산하였다. 이 방법은 각 입자가 puff의 중심에 위치하고 있고 이 puff의 농도분포는 정규분포를 한 것으로 가정하여 농도를 계산하는 방법이다. 이 때 필요한 각 방향별 확산거리는 puff가 경과해온 경로에서의 바람의 표준편차를 시간적분하여 구하며, 어느 주어진 시공간에서의 농도는 각 puff에 의하여 기여한 농도를 모두 합하면 된다.

따라서 방사성 입자의 농도 χ 와 방출량 Q 의 비로 나타내는 대기확산인자 $\chi/Q(x, y, z)$ 는 입자가 지표면에서 완전 반사된다고 가정하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\chi/Q = \frac{2\Delta t}{(2\pi)^{2/3}} \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sigma_{xk} \sigma_{yk} \sigma_{zk}} \exp \left[-\frac{(x_k - x)^2}{2\sigma_{xk}^2} - \frac{(y_k - y)^2}{2\sigma_{yk}^2} - \frac{(z_k - z)^2}{2\sigma_{zk}^2} \right] \text{ ----- (3)}$$

식(3)에서 (x_k, y_k, z_k) 는 k 번 입자의 위치, $\sigma_{xk}, \sigma_{yk}, \sigma_{zk}$ 는 k 번 입자의 x, y, z 방향의 확산 표준편차 거리를 나타낸다.

2.3 모델 수행

해안지역에서 빈번히 발생하는 해륙풍을 고려한 방사성 물질의 대기확산 예측을 위하여 해륙풍이 발생하기 쉬운 조건인 봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날의 경우에 대하여 모델링하였다.

라그랑지 입자확산 모델링에 사용된 종관 및 증규모 바람장은 삼차원 미세 격자계 해륙풍 모델링 결과[5]를 이용하였으며, 그림 1에 제시하였다. 또한 모델링 영역 및 지형을 그림 2에 제시하였으며, 발전소 서쪽 약 7 km 지점에 삼대봉이 있고, 울산 서쪽에 가지산이 위치하고 있다.

입자 방출은 발전소의 10 m 고도에서 1분에 한 개씩의 가상입자가 연속적으로 방출된다

고 가정하였으며, 일주기적 해륙풍 순환의 영향을 알아보기 위해 먼저 가상입자를 06시부터 24시간 동안 연속 방출시켜 평형상태에 도달시킨 후, 이 때의 방사성 입자의 분포를 초기조건으로 삼아 06시부터 다시 1분에 한 개씩 가상입자를 방출시키면서 대기확산 모델링을 수행하였다. 농도계산의 단순화를 위해 모델 수행시 입자의 방사성 붕괴와 지표면 침적은 일어나지 않는다고 가정하였다.

3. 라그랑지 입자 확산모델링 결과

3.1 방사성 입자의 분포

그림 3은 모델링을 통해 얻어진 삼차원 공간에서의 입자들의 위치를 수평면상에 투영시켰을 때의 입자 분포양상을 나타낸 것이다.

06시에는 대부분의 입자들이 야간에 발달한 육풍(서풍)으로 인해 주로 해상에 분포하고 있으며, 일출 후 해안지역에서부터 발달하기 시작한 해풍(동풍)의 영향으로 해안지역에 분포되어 있던 기존의 입자와 새로 배출된 입자들은 내륙으로 이동하고 배출되어 해양으로 이동 하였던 입자들은 해상의 서풍에 의해 계속 동쪽으로 이동되는 것을 볼 수 있다. 그러나 낮 시간 동안 강화된 해풍에 의해 18시에는 해상에서 이동해 온 기존의 입자들과 새로이 배출된 입자들이 내륙으로 수송되어 부지와 부지 서쪽 삼대봉 및 토함산 동쪽 경사면에 수렴되고, 해풍의 영역이 해양으로 확대되면서 해상의 입자들도 해안선 쪽으로 이동하는 모습을 볼 수 있다. 그후 내륙에서 발달한 산곡풍의 영향으로 내륙의 입자들 중 일부가 내륙 깊숙이 이동되는 현상을 보이고 있지만, 일몰후 해안지역에서 부터 발달하기 시작하는 육풍의 영향으로 입자들이 다시 바다쪽으로 이동되기 시작하여 06시에는 초기 입자 분포로 돌아가는 일주기적 현상을 볼 수 있다.

3.2 대기확산인자의 일변화

그림 4는 방사성 입자의 지상 농도분포를 알아보기 위해 지상에서의 대기확산인자 χ/Q 의 시간에 따른 분포를 나타낸 것이다.

입자들의 분포와 마찬가지로 06시에는 그 최대값이 발전소 부지 동쪽 해상에 위치하고 있으며, 최대축이 발전소에서 남동쪽 해상으로 뻗어 있다. 야간의 육풍에 의해 해양으로 빠져 나갔던 입자들이 일출후 해풍이 발달되면서 다시 해안으로 이동되기 시작하나 12시까지는 해풍의 발달이 미약하여 해풍전면의 수렴대가 해안선 부근에 국한되어 나타나고 있다. 시간이 경과함에 따라 입자들이 내륙으로 이동하여 18시에는 대기확산인자가 10^{-6} 이상인 지역이 내륙 약 10 km까지 진입하는 것을 볼 수 있으나 해풍전면에 뚜렷한 수렴대가 형성되면서 대기확산인자가 10^{-10} 이상인 지역은 해풍 영향범위에 국한되어 나타나고 있다. 일몰 후 해풍의 에너지원이 소멸되면서 해풍전면의 수렴대도 사라져 내륙의 산곡풍 등 복잡한 국지풍계에 의해 대기확산인자가 10^{-10} 이상인 지역이 가지산 북쪽 지역까지 확장되나 10^{-6} 이상 지역은 계속 발전소 부근에 한정되어 나타나고 있다.

표 1은 지상에서의 대기확산인자 χ/Q 의 최대값이 나타난 지점의 방출원으로 부터의 동서방향(x), 남북방향거리(y) 및 절대거리(r)를 나타내고, 그림 5는 최대값을 나타낸다.

최대값이 나타나는 지점은 방출원으로부터 180 km 이내에서 나타나고 있다. 시간대별로는 일출전에는 육풍의 영향으로 최대값이 나타나는 지점이 남동쪽에 위치하고 있던 것이 해풍이 발달하면서 점차 남쪽을 거쳐(12시) 서쪽으로 이동하고 있으며, 일몰후 육풍에 의해 다

시 남쪽을 거쳐(00시) 남동쪽 해상으로 되돌아 가는 추세를 보이고 있다.

시간대별 지상 대기확산인자의 최대값은 24시간 동안 3번의 정점이 나타나는 변동추이를 보이고 있는데, 해풍과 육풍의 풍향교체로 해안지역에서 일시적으로 풍속이 약해지는 오전 09시에 정점을 보이고, 일출후 해풍이 강화되어 오염물질이 활발히 확산되면서 최대값이 점차 작아지다가 해풍에 의해 해상에 존재하던 입자가 해안지역까지 유입되는 15시부터는 최대값이 커져 21시에 다시 정점이 나타난다. 이후 해풍에 의한 해상으로부터의 입자 수송이 일어나지 않게 되면서부터 다시 최대값이 작아지기 시작하다 내륙으로 이동되었던 입자가 야간의 육풍에 의해 해안지역으로 재순환되면서 새벽 3시에 일중 대기확산인자의 최대값이 나타나게 된다.

4. 토의 및 결론

월성원전 부지 주변에서 빈번히 발생하는 해륙풍을 고려한 방사성 물질의 대기확산 양태를 살펴보기 위해 봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날에 대해 방사성 입자가 1분에 한 개씩 연속방출된다고 가정하여 모델링하였다.

모델링 결과, 해륙풍의 풍향변화에 따라 입자의 분포도 일주기적으로 변화하는 등 시간별 방사성 입자의 확산 및 수송이 해륙풍에 크게 좌우되어 나타남을 볼 수 있었다.

특히, 이미 방출되어 방출원으로부터 멀리 떨어진 지역까지 수송되었던 입자들이 풍향교체로 인해 다시 방출원으로 되돌아오는 재순환 현상이 농도 분포에 중요한 역할을 하는 것을 확인하였다.

입자의 재순환에 의해 대기확산인자 χ/Q 의 최대값이 나타나는 위치가 방출원 부근에서의 풍향의 변화와 동일하게 바뀌지 않고 약 3시간의 시간차를 두고 변하고 있으며, 육풍(서풍)이 발달하여 입자가 해상으로 빠져날 것으로 예상되었던 새벽 03시에 대기확산인자가 일중 최대값을 나타내고 있다.

그러나 본 연구에서는 이러한 재순환의 영향을 정량적으로 규명하지 못하였는데, 향후 기존에 방출된 입자와 각 시간대에 새로이 방출되는 입자들의 농도분포 기여도를 분리하여 비교·분석함으로써 이를 정량화하고자 한다.

또한 다른 종관기상 사례에 대해서도 모델링하여 월성원전 부지 주변에서의 방사성 입자의 대기확산 양태에 대해 종합적인 연구를 수행할 것이다.

참 고 문 헌

1. Park, S.U., Estimation of Non-reactive Pollutant Concentration Using the Lagrangian Particle Dispersion Model, *J. of Kor. Meteor. Soc.*, 30(1), 1-20, 1994.
2. Kaimal, J.C. et al., Turbulence Structure in the Convective Boundary Layer, *J. of Atmos. Sci.*, 33, 2152-2168, 1976
3. Legg, B.J. and M.R. Raupach, Markov-chain Simulations of Particle Dispersion in Homogeneous Flows : The Mean Drift Velocity Induced by a Gradient in Eulerian Velocity Variance, *Bound. Layer Meteor.*, 24, 3-13, 1982
4. Yamada, T., C.Y. Kao and S. Bunker, Airflow and Air Quality Simulation over the Western Mountainous Region with a Four Dimensional Data Assimilation Technique, *Atmos. Environ.*, 23, 539-554, 1989.
5. 전력연구원, 월성원전 지역에 적합한 환경방사선 영향평가모델 개발 1차 중간보고서, 1996.

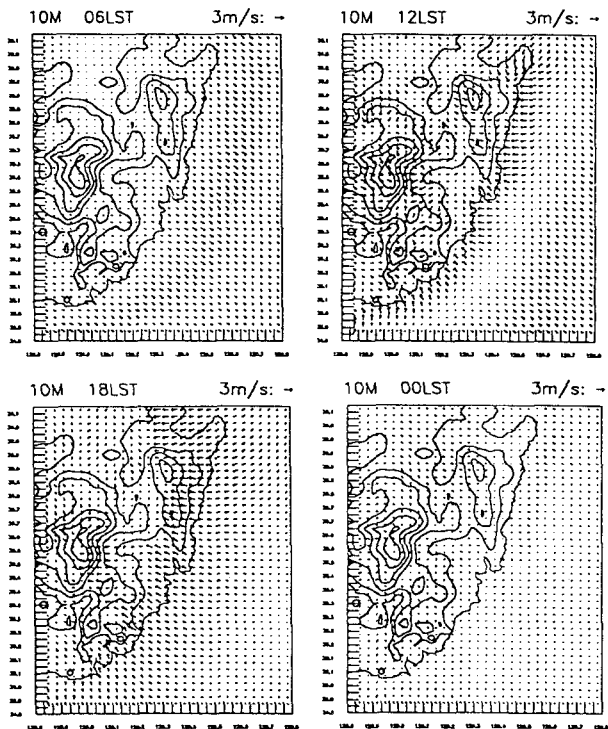


그림 1. 라그랑지 입자확산 모델링에 사용된 종관 및 중규모 바람장. 삼차원 미세 격자계 해륙풍 모델링을 통해 얻은 결과로 좌측 상단부터 우측방향으로 각각 06, 12, 18, 00시의 수평바람 분포를 나타냄.

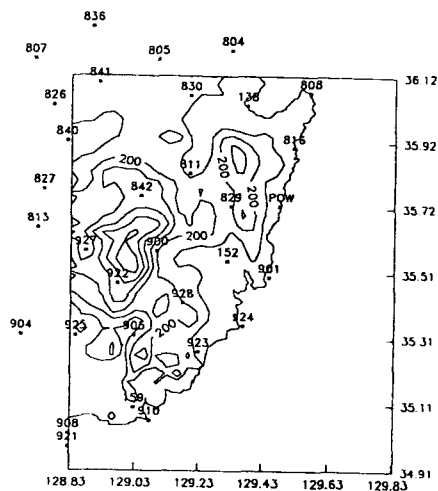


그림 2. 모델링 영역 및 지형 (그림의 POW는 월성원전, 152는 울산, 138은 포항 기상관측소임)

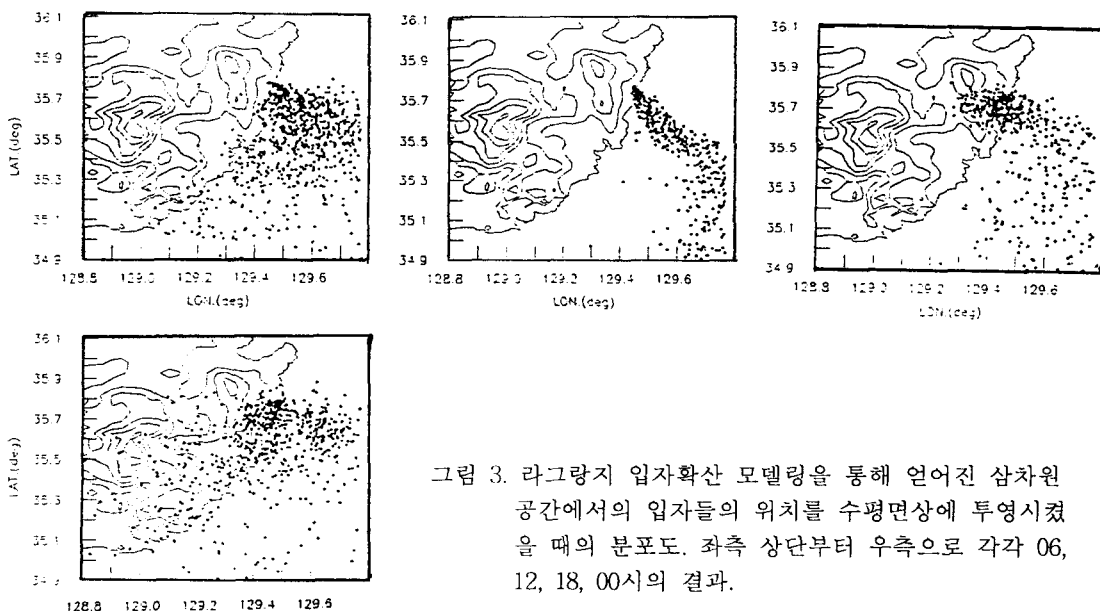


그림 3. 라그랑지 입자확산 모델링을 통해 얻어진 삼차원 공간에서의 입자들의 위치를 수평면상에 투영시켰을 때의 분포도. 좌측 상단부터 우측으로 각각 06, 12, 18, 00시의 결과.

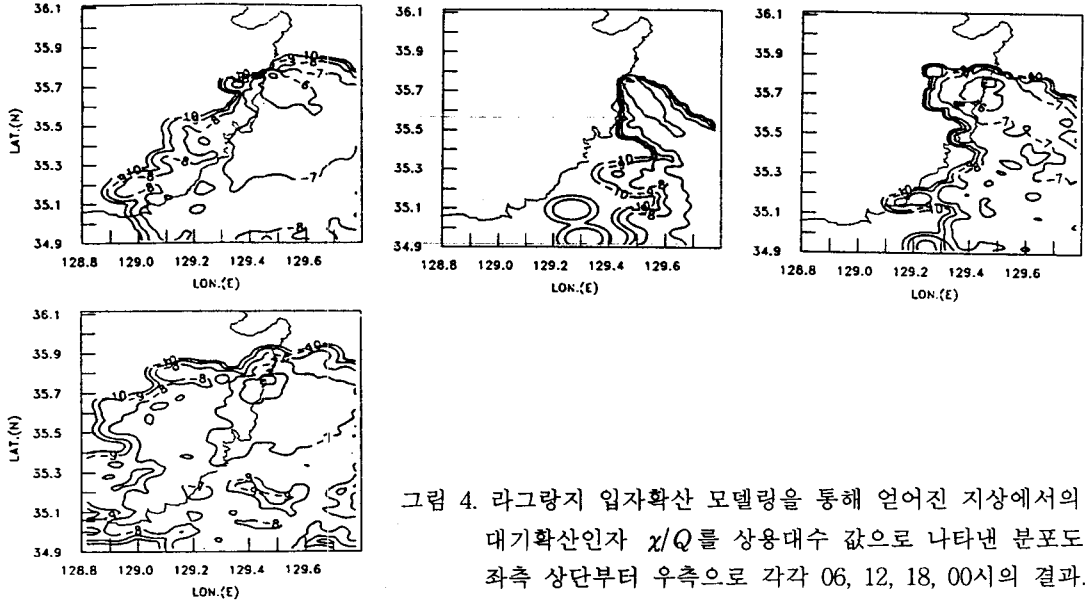


그림 4. 라그랑지 입자확산 모델링을 통해 얻어진 지상에서의 대기확산인자 x/Q 를 상용대수 값으로 나타낸 분포도. 좌측 상단부터 우측으로 각각 06, 12, 18, 00시의 결과.

표 1. 각 시간별 대기확산인자의 최대값이 발생하는 지점. x의 -(음) 값은 방출원으로부터 서쪽, y의 -(음) 값은 방출원으로부터 남쪽에서의 거리를 나타낸다.

Time	동서방향 거리 x (m)	남북방향 거리 y (m)	절대거리 r (m)
06	120	-60	134 (남동)
09	120	-120	170 (남동)
12	0	-60	60 (남)
15	-180	0	180 (서)
18	-60	0	60 (서)
21	-60	0	60 (서)
00	0	-60	60 (남)
03	60	-60	180 (남동)

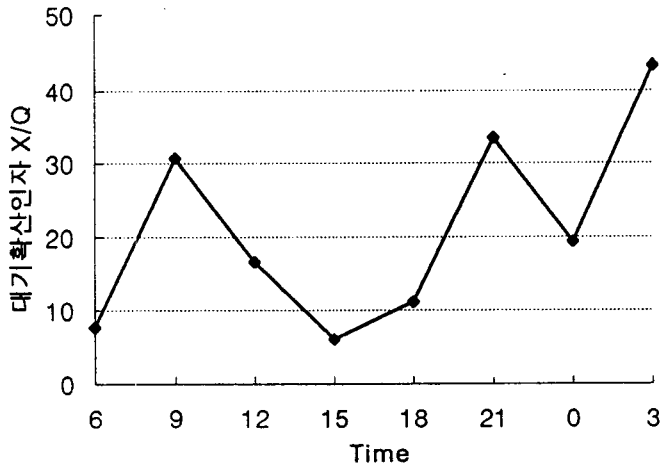


그림 5. 지상에서의 대기확산인자 x/Q 의 각 시간별 최대값. (단위는 10^{-5} sec/m^3)