

월성원전 부지의 가을철 방사성 물질의 대기확산인자 분포 특성

이갑복, 이명찬, 송영일
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

삼차원 해륙풍 모델과 라그랑지안 입자확산모델을 이용하여 해안지역에 위치한 원전으로부터 정상운전시 장기적으로 연속 방출되는 방사성 물질의 대기확산 평가방법론을 개발하였다. 개발된 방법론을 적용하여 월성원전 부지를 대상으로 풍향, 풍속 및 운량에 따라 범주화된 각 종관기상 상태에 대해 가을철 방사성 물질 대기확산 특성을 분석하였다. 분석 결과, 방사성 물질의 계절 또는 연중 평균적인 대기확산인자의 분포는 종관바람 등과 같은 주풍의 발생빈도에 영향을 받을 뿐만아니라, 해륙풍 등과 같은 국지 대기순환의 특성에 따라서도 그 분포특성이 결정됨을 알 수 있었다.

1. 서 론

원자력발전소 가동에 따른 주변 환경 및 주민의 방사선 영향을 보다 정확히 평가하기 위해서는 부지 지역의 국지 대기순환을 적절히 반영할 수 있는 평가 방법론을 적용하여야 한다. 우리나라는 전 원전이 해안지역에 위치하고 있어 방사성 물질의 대기확산 및 이동은 해안지역의 대표적인 국지 대기순환인 해륙풍에 크게 영향을 받고 있다.

그러나 이 해륙풍은 시간적으로 하루 주기로 정반대의 대기순환이 일어나므로 해풍이나 육풍이냐에 따라 오염물질의 대기확산이 판이하게 달라지게 된다. 또한 수평적으로는 수 ~ 수십 km, 수직적으로는 2 km 이내의 지역에서 국지적으로 형성되어 공간적인 대기흐름의 변화도 매우 심하다[1].

따라서 이러한 복잡한 국지적인 기상현상을 반영할 수 있는 대기확산모델이 필요하나, 바람장 계산을 위한 입력자료의 수집 및 계산에 많은 시간이 소요되므로 이를 해결할 수 있는 새로운 방법이 도입되어야 한다.

최근의 연구결과에 의하면, 해륙풍 순환은 종관규모의 기상상태에 크게 영향을 받고 있다. 따라서 종관기상 상태에 따른 국지 대기순환과 확산 특성에 대한 데이터베이스를 통해 계산 시간에 대한 제약을 해결하고, 또한 부지 주변의 국지적인 대기순환을 반영할 수 있는 대기확산평가가 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 월성원전 부지를 대상으로 풍향, 풍속 및 운량에 따라 범주화된 각 종관기상 상태에 대해 삼차원 해륙풍 모델[2]과 라그랑지안 입자확산모델[3]을 이용하여 일평균 대기확산인자를 계산하여 데이터베이스를 구축하고, 일평균 대기확산인자와 종관기상 상태의 계절 또는 연간 발생일 빈도율을 가중함수로 하여 계절 또는 연평균 대기확산인자를 계산하는 장기 대기확산 평가 방법론을 개발하였다. 또한 개발된 방법론을 적용하여 가을철 각 종관기상 상태에 대한 대기확산 시뮬레이션을 수행하여 가을철 종관기상 상태에 따른 대기확산 특성을 분석하였다.

2. 대기확산인자 계산 방법

그림 1은 원전으로부터 대기중으로 방출된 방사성 물질의 계절별 또는 연평균 대기확산인자를 계산하는 라그랑지안 대기확산 모델링 체계(K-LADM : Lagrangian Atmospheric Dispersion Modeling System)를 보여주고 있다.

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

계절별로 분류된 각 종관기상 조건에 대해 삼차원 해륙풍 모델로 부지 주변의 바람, 온도 등의 기상장을 계산하고, 그 결과를 라그랑지안 입자확산모델의 입력자료로 사용하여 종관기상 조건에 대한 계절별 일평균 대기확산인자를 구한다. 일평균 대기확산인자에 각 종관기상 상태의 계절 또는 연간 발생일 빈도율을 곱하여 가중평균하여 계절 또는 연평균 대기확산인자를 계산한다.

본 연구에 사용된 삼차원 해륙풍 모델은 두 단계의 시뮬레이션 과정을 거치는데, 경계조건에 영향을 최소화하기 위해, 먼저 한반도 전역을 대상으로하는 격자간격 15 km의 광역의 성긴 격자계(46×46 격자망) 영역에 대해 시뮬레이션을 수행한 후, 그 결과를 경계조건으로 하여 월성원전 주변지역의 격자간격 3 km의 미세 격자계(31×46 격자망) 영역에 대한 시뮬레이션을 수행한다. 모델에 사용된 방정식계는 운동방정식, 정역학방정식, 열역학방정식, 비습방정식, 연속방정식 그리고 토양층 열속방정식으로 구성되어 있으며, 좌표계는 지형의존 연직좌표계(x, y, z^*, t)를 사용하였다. 모델의 초기 기상조건 및 nudging 자료는 지난 5년간(1990-1994년)의 기상청 관측소 및 부지 기상탑 관측자료를 해당 종관기상 조건별로 분류하여 시간대별로 평균하고, 각 격자점으로 재분석하여 사용하였다. 모델에 사용된 지형조건, 대기경계층 역학, 초기 및 경계조건 등은 참고문헌 [4]에 자세히 언급하였다.

방사성 물질의 대기확산 예측은 연속적으로 배출되는 방사성 물질 입자들을 시간에 따라 계속적으로 추적하여 원하는 시각에서의 각 입자들의 위치를 결정하여 농도분포를 계산하는 라그랑지안 입자확산모델을 사용하였다. 방사성 입자의 위치는 다음과 같이 결정된다.

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

여기서 X_i 는 한 입자의 좌표계상에서의 공간상 위치를 나타내고, \overline{U}_i 는 입자가 위치한 곳에서의 중규모 바람성분을, u_i' 는 입자가 위치한 지점의 난류성분을, 그리고 Δt 는 시간 변화 즉 적분시간간격을, i 는 좌표계의 x, y, z 성분을 나타낸다. 중규모 바람성분 \overline{U}_i 는 삼차원 미세 격자계 해륙풍 모델로 얻어지는 i 성분의 바람이고, 난류성분 u_i' 는 Markov 과정[5]을 이용하여 매개변수화할 수 있다. 어느 주어진 시간의 대기확산인자는 배출입자의 수가 작아도 적용할 수 있는 kernel density 방법[6]으로 농도를 계산하였다.

본 연구에서는 종관기상 조건에 따른 방사성 물질의 대기확산 특성을 분석하기 위해 가을철에 대해 발생빈도가 2% 이상인 기상조건에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 입자 방출은 발전소의 10 m 고도에서 1분에 한 개씩의 가상입자가 연속적으로 방출된다고 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. 결과

지난 5년간(1990-1994년)의 0000 GMT(세계표준시) 850 hPa 일기도의 지균풍과 부지 인근의 포항, 울산 기상청 관측소 일평균 운량 자료로 구해진 가을철 각 종관기상 조건별 발생비율과 삼차원 해륙풍 시뮬레이션 결과로 얻어진 주간과 야간의 평균풍향에 대해 표 1에 제시하였다. 표 1에서 경우의 세자리수 중 첫 번째 자리는 풍향(1=북, 2=동, 3=남, 3=서풍), 두 번째 자리는 풍속등급(1=약, 2=강한 바람), 세 번째 자리는 운량등급(1=맑은, 2=흐린 날)을 나타낸다. 표 1을 보면 전 풍향에 대하여 해륙풍 발생의 최적조건인 지균풍이 약한 맑은 날의 발생빈도율은 30.5 %로 나타났다.

삼차원 해륙풍 시뮬레이션 결과로 얻어진 낮과 밤의 풍향 변화를 통해 종관기상 조건에 따른 월성원전 지역의 대기순환 특성을 보면, 종관바람이 강하거나 흐린 날에는 해륙풍이 발달하지 못하였으나, 종관 바람이 약한 맑은 날의 경우에는 해륙풍이 잘 발달하였다.

종관바람이 약한 맑은 날의 해륙풍 특성을 자세히 살펴보면, 낮에는 종관풍향에 관계없이 해풍인 동풍성분의 바람이 발달하였으나, 야간에 육지에서 해양으로 부는 육풍은 종관바람이 동풍과 남풍의 경우에는 발달하지 못하였다. 이는 낮에 일사에 의한 열적 기압경도력은 종관 기압경도력 보다 더 크게 형성되지만, 밤에는 야간 지구복사 냉각에 의해 형성되는 열적 기압경도력은 그렇지 못하여 야간에는 종관바람이 더 탁월하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 시간에 따른 풍향의 변화도 종관기상 조건에 따라 서로 다른 양상을 보여주고 있다. 종관 풍향이 북풍과 서풍인 경우에는 낮과 밤에 따라 서로 반대되는 풍향을 보이고 있으나 동풍과 남풍의 경우에는 주·야간 모두 동일 계열의 바람이 불고 있다.

종관기상 조건에 따른 이러한 국지 대기순환은 방사성 물질의 대기확산 양상에 큰 영향을 주고 있다. 그림 2에 바람이 약한 맑은 날의 경우에 대해 상용대수로 나타낸 일평균 지상 대기확산인자 분포를 제시하였다. 종관풍향이 북풍(111)과 서풍(411)의 경우에는 해풍과 육풍의 풍향교체로 낮과 밤의 풍향변화에 따라 주풍하 방향을 중심으로 넓게 분포되어 있는 반면, 동풍(211)과 남풍(311)의 경우에는 야간에 육풍이 발달하지 못하여 낮과 밤에 따른 풍향변화가 작아 대기확산인자의 값이 $10^{-8} \text{sec}/m^3$ 이상인 지역이 상대적으로 좁게 나타나고 있다.

월성원전 지역의 가을철 평균 대기확산인자의 분포를 알아보기 위해 각 종관기상 조건별 일평균 대기확산인자의 값에 각 종관기상 조건의 발생 빈도율(표 1)을 가중합수로 곱하여 가을철 평균 대기확산인자를 계산하여 그림 3에 제시하였다. 표 1의 가을철 종관기상 조건의 발생비율을 풍향별로 살펴보면 서풍이 51.4 %로 가장 높고, 북풍(29.0%), 남풍(9.6%) 그리고 동풍(8.9%) 순으로 나타나고 있다. 따라서 가을철 평균 대기확산인자의 분포는 주로 부지 남동쪽으로 분포할 것으로 예상할 수 있을 것이다. 그러나 그림 3의 대기확산인자의 분포를 보면, 전반적인 대기확산인자의 최대축은 남동쪽 해상에서 나타나고 있으나, 남풍과 동풍의 발생빈도가 매우 낮음에도 불구하고 부지주변의 $10^{-8} \text{sec}/m^3$ 의 등치선이 부지 북쪽과 서쪽으로도 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 동풍과 남풍의 종관기상

조건은 그 발생빈도가 작더라도 국지 대기순환이 주 풍하방향으로 형성되기 때문에 방사성 물질이 주로 주풍하 방향으로 확산되는 데 비해, 발생빈도가 큰 서풍과 북풍의 종관기상 조건일 경우에는 낮과 밤에 따른 풍향변화가 매우 심하여 주 풍하방향 뿐만아니라 서쪽과 북쪽방향으로의 확산에도 크게 기여하기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 삼차원 해륙풍 모델과 라그랑지안 입자확산모델을 이용하여 계절 또는 연평균 방사성 물질 대기확산 평가방법론을 개발하고, 개발된 방법론을 적용하여 월성원전 부지를 대상으로 풍향, 풍속 및 운량에 따라 범주화된 각 종관기상 상태에 대해 가을철 방사성 물질 대기확산 특성을 분석하였다.

삼차원 해륙풍 시뮬레이션 결과, 종관바람이 강하거나 흐린 날에는 해륙풍이 발달하지 못하였으나, 종관 바람이 약한 맑은 날의 경우에는 잘 발달하였다. 해륙풍이 발달하는 경우에도 종관기상 조건에 따라 방사성 물질의 대기확산 특성은 큰 차이를 보여주고 있다. 종관풍향이 북풍과 서풍의 경우에는 해풍과 육풍의 풍향교체가 뚜렷하여 낮과 밤의 풍향변화에 따라 일평균적인 주 풍하방향을 중심으로 일평균 확산범위가 넓게 나타나는 반면, 동풍과 남풍의 경우에는 야간에 육풍이 발달하지 못하여 낮과 밤에 따른 풍향변화가 작아 상대적으로 확산범위가 좁게 나타나고 있다.

종관기상 조건에 따른 이러한 대기확산 특성은 가을철 평균 대기확산인자의 분포에도 영향을 주어, 발생빈도가 큰 서풍과 북풍의 풍하방향인 부지 동쪽과 남쪽 뿐만아니라, 남풍과 동풍의 발생빈도에 비해 부지 북쪽과 서쪽으로도 비교적 고르게 확산될 수 있음을 보여주었다.

즉, 방사성 물질의 계절 또는 연중 평균적인 대기확산인자의 분포는 종관바람 등과 같은 주풍의 발생빈도에 영향을 받을 뿐만아니라, 해륙풍 등과 같은 국지 대기순환의 특성에 따라서도 그 분포특성이 결정됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Atkinson, B. W., *Meso-scale Atmospheric Circulation*, Academic Press, London, pp125, 1981.
2. 이갑복, 이명찬, 송명재, "월성원전 부지의 삼차원 미세격자계 해륙풍 모델링," 한국원자력학회 '97 춘계학술발표회논문집(I), 457-462, 1997
3. 이갑복, 이명찬, 송명재, "월성원전 부지 주변의 해륙풍을 고려한 방사성 물질의 대기확산 모델링," 한국원자력학회 '97 춘계학술발표회논문집(I), 463-468, 1997
4. Lee, G. B., M. C. Lee and Y. I. Song, "Inland penetration of sea breeze around Wolsung NPP site," *Proc. International Symposium on Radiation Safety Management '97*, KEPRI/KNS, Korea, 274-283, 1997.
5. 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
6. 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.

표 1. 지난 5년간(1990-1994년)의 0000GMT(세계표준시) 850 hPa 일기도의 지균풍과 부지 인근의 포향, 울산 기상청 관측소 일평균 운량 자료로 구해진 가을철 각 종관기상별 발생빈도와 삼차원 해륙풍 시뮬레이션 결과로 얻어진 월성원전 부지의 주간과 야간의 풍향

경우	111	112	121	122	211	212	221	222	311	312	321	322	411	412	421	422	
종관기상 발생비율(%)	9.2	4.6	12.1	3.1	4.4	2.2	2.0	1.3	2.6	3.5	0.4	3.1	14.3	5.5	2.5	8.1	
풍향	주간	E	NW ~N	NW ~N	NW	E	NE	NE	-	SE	SE	-	SE	SE	SW	W~ SW	SW
	야간	S~ SW	NW	NW	NW	NE ~E	NE	NE	-	S~ SW	SW	-	S	SW	S~ SW	S~ SW	SW

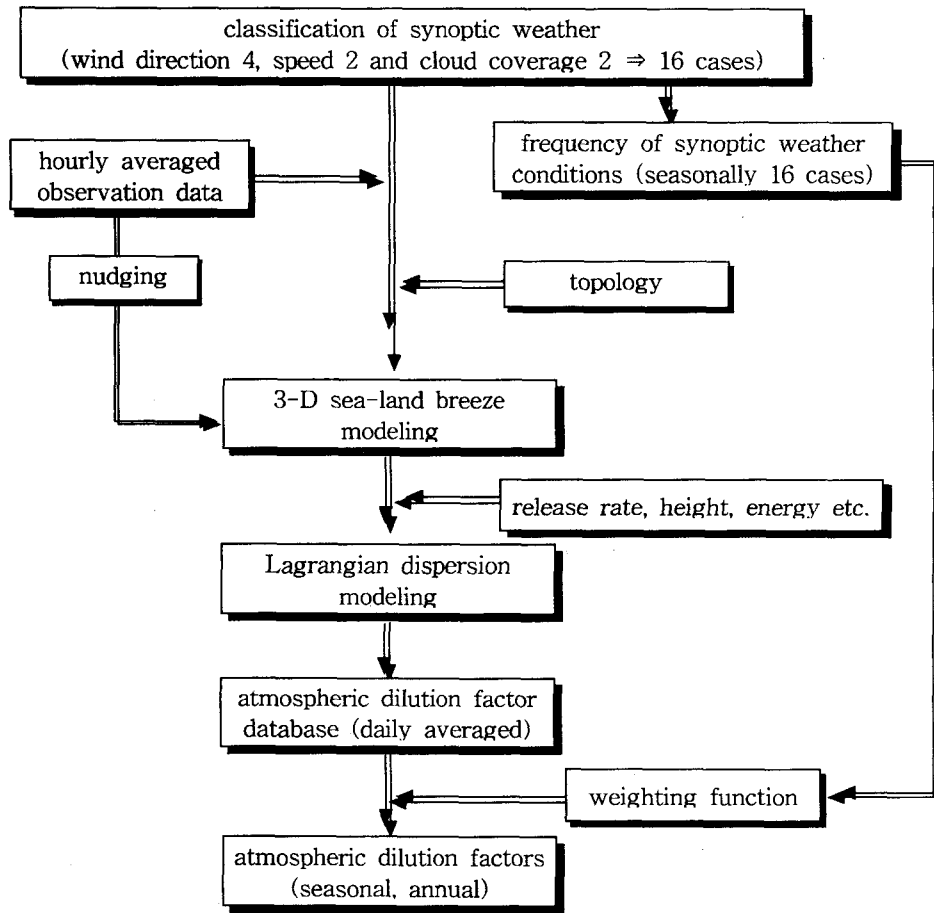


그림 1. 방사성 물질의 계절별 또는 연평균 대기확산인자 계산을 위한 라그랑지안 대기확산모델링 체계(K-LADM)

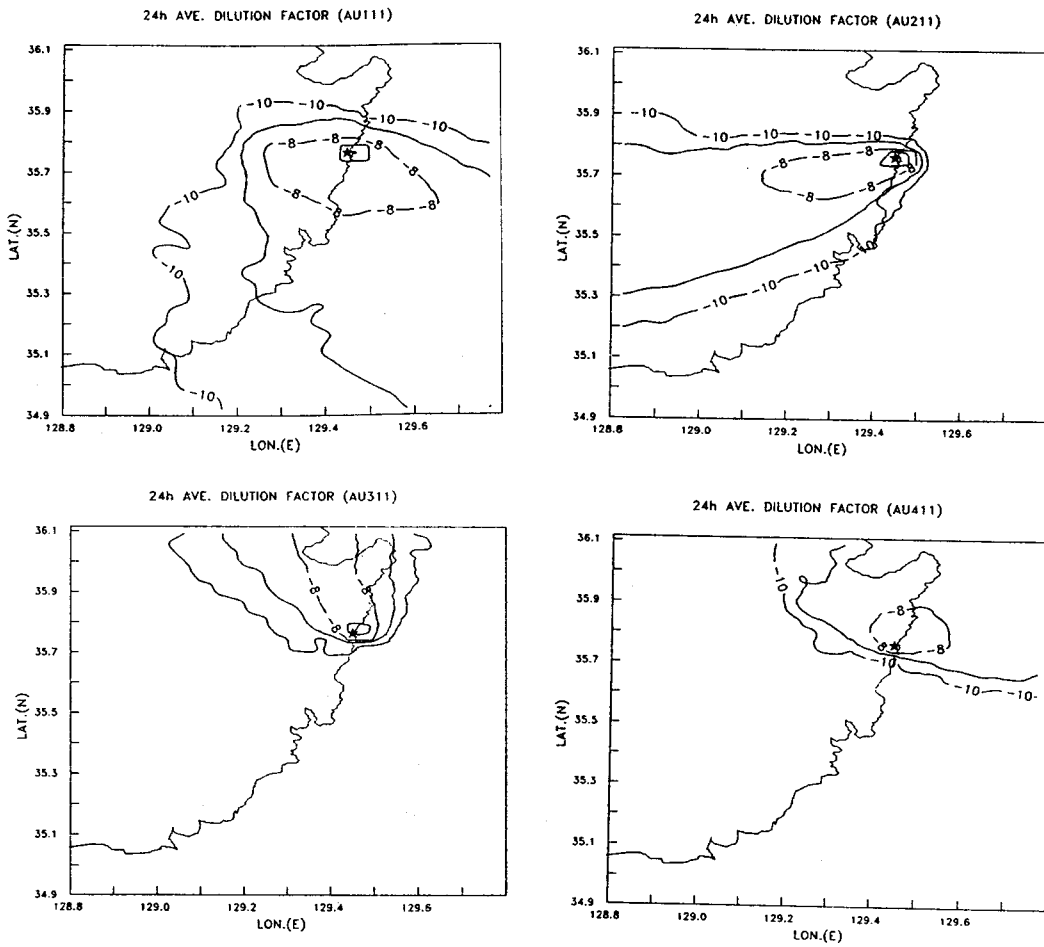


그림 2. 라그랑지안 입자확산 시뮬레이션을 통해 얻어진 일평균 지상 대기확산인자의 분포. 등치선의 숫자는 상용대수로 단위는 sec/m^3 임. 좌측상단부터 오른쪽으로 각각 중관 기상조건이 가을철 111, 211, 311 그리고 411의 경우

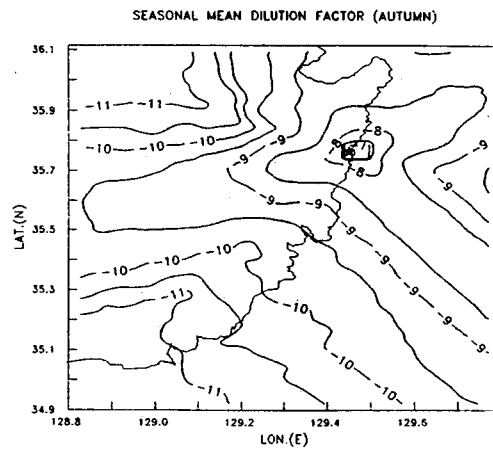


그림 3. 가을철 평균 지상 대기확산인자의 분포. (등치선의 숫자는 상용대수로 단위는 sec/m^3 임.)