

월성원전 부지의 삼차원 미세 격자계 해륙풍 모델링

이갑복, 이명찬, 송명재

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원전에서 정상가동시 또는 사고시 대기중으로 방출된 방사성 물질에 의한 주변환경 및 주민들의 영향을 보다 정확히 평가하기 위해 월성원전을 대상으로 부지 주변지역의 해륙풍 등과 같은 국지순환을 세밀하게 모사할 수 있는 삼차원 미세 격자계 해륙풍 모델을 개발하였다. 개발된 모델을 이용하여 봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날에 대해 월성원전 주변지역의 해륙풍 발달·소멸, 해풍의 내륙 진입거리 및 해륙풍의 연직구조 등을 모사하고, 모사 결과를 관측값과 비교하여 모델의 특성을 파악하였다.

1. 서 론

원전에서 정상가동시 또는 사고시 불가피하게 대기중으로 방출된 방사성 물질은 바람을 매개로 확산·이동하여 환경 매질(대기, 토양, 동·식물, 지표(하)수, 해수 등)을 거쳐 주변 주민에게 도달되어 직·간접적인 방사선 영향을 주게 된다. 따라서 보다 정확한 환경방사선 영향평가를 위해서는 적절한 기상장(바람장, 난류장 등) 모델과 대기확산모델을 이용하여 방사성 물질의 대기중 분포를 정확히 예측 또는 추정하여야 한다.

우리나라 원전은 모두 주변에 높고 낮은 산들이 산재해 있는 해안지역에 위치하고 있어, 바다와 육지의 매질 특성차에 의해 발생하는 해륙풍과 지형에 의한 산곡풍 등과 같은 매우 복잡한 국지순환의 영향을 받고 있다. 그러나 이러한 국지순환은 수평적으로는 수 ~ 수십 km, 연직적으로는 약 2 km 이내의 좁은 지역에서 하루 주기로 정반대의 대기순환이 일어나기 때문에, 해륙풍 또는 산곡풍의 경계지역에서는 비록 가까운 거리라 하더라도 풍향·풍속의 차가 현저한 매우 복잡한 대기흐름을 보이고 있다[1].

현재 우리나라 원전에서는 미국 규제지침 1.111[2]에 근거하여 개발된 가우시안 대기확산 모델을 사용하고 있으나, 가우시안 모델은 바람장을 발전소 기상탑 단일지점의 자료를 전 계산지역에서 동일하게 적용하고 있기 때문에 시·공간적인 변화가 심한 복잡한 지형에서의 국지순환을 잘 반영하지 못하고 있다.

이갑복과 손순환[3]은 원전 주변의 국지순환을 모사하기 위하여 월성원전 부지를 대상으로 해륙풍이 발생하기 쉬운 봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날의 경우에 대해 수평 격자간격 15 km의 해륙풍 모델링을 하였으나, 발전소 부근의 규모가 작은 지형조건을 모델링에 세밀하게 반영시키지 못하여 해풍의 내륙 진입거리, 해풍·육풍 교체시 풍향변화 등이 관측결과와 많은 차이를 보였다.

따라서 본 연구에서는 월성원전을 대상으로 주변지역의 해륙풍 등과 같은 국지순환을 세

밀하게 모사할 수 있는 삼차원 미세 격자계 해륙풍 모델을 개발하여, 봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날의 경우에 대해 모델링하여 그 결과에 따른 월성원전 주변지역의 해륙풍 발달·소멸, 해풍의 내륙 진입거리 및 연직구조 등에 대한 해륙풍 특성을 분석하고, 모델링 결과를 관측값 및 성긴 격자계 결과와 비교하여 모델의 특성을 파악하였다.

2. 삼차원 미세격자계 해륙풍 모델링 및 결과

2.1 모델 개요 및 수행

해륙풍과 같은 국지순환은 일반적으로 서쪽에서 동쪽으로 흐르는 중관규모의 대기흐름에 크게 영향을 받기 때문에, 예측시간 동안 관심지역의 기상장에 영향을 줄 수 있는 범위까지 모델링 영역에 포함시켜야 한다. 그러나 전 영역을 미세 격자망으로 모델링할 경우에는 계산시간이 많이 소요되므로, 관심지역은 미세 격자망으로 구성하고 그외 지역은 성긴 격자계를 사용하였다. 그림 1은 월성원전 주변지역에 대한 삼차원 해륙풍 모델링 영역으로, 격자간격 15 km의 광역의 성긴 격자계(46×46)와 월성원전 주변지역을 세밀하게 모사할 수 있는 격자간격 3 km의 미세 격자계(31×46) 모델링 영역을 보여 준다.

모델에 사용된 방정식계는 운동방정식, 정역학방정식, 열역학방정식, 비습방정식, 연속방정식 그리고 토양층 열속방정식이 사용되었으며, 좌표계는 지형의존 연직좌표계(x, y, z^*, t)를 사용하였다[4]. 모델링은 격자간격 15 km의 성긴 격자계에 대해 먼저 수행하고, 그 결과를 내·외삽하여 격자간격 3 km의 미세 격자계 모델의 경계값으로 주고 미세 격자계에 부합되는 지형(그림 2)을 대상으로 미세 격자계 해륙풍 모델을 재수행하였다. 미세 격자계에 사용된 지형에서는 성긴 격자계 지형조건에는 반영되지 않았던 부지 서쪽 7 km 지점에 위치하고 있는 삼대봉과 북서쪽의 토함산 등의 지형을 보다 더 세밀하게 고려해 줄 수 있다.

해륙풍이 발생하기 쉬운 조건인 봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날에 대하여 모델링하였다. 모델의 초기조건은 지난 5년(1988~1992년)동안 사례의 중관기상장이 나타난 날의 기상장을 평균하여 초기입력자료로 삼았으며 그 세부내용은 표 1, 표 2와 같다.

2.2 모델링 결과

2.2.1 지상 수평바람분포

봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날의 경우에 대한 미세 격자계 해륙풍 모델링 결과의 지상 10 m 고도에서의 수평바람의 시간에 따른 변화를 그림 3에 제시하였다.

약한 북풍의 중관바람으로 인하여 해안가에서는 육풍의 북풍이 불다가 일출과 더불어 육풍이 약화되면서 09시부터 해풍이 발달하기 시작하여, 그후 점점 강화되면서 내륙으로 진입하였다. 18시에서는 동해에서 발달한 해풍이 발전소 서쪽의 내륙에 위치한 산의 동쪽 사면까지 진입하였으나 울산지역에서는 해안에서 평지를 따라 내륙으로 더 깊숙히 진입하였다. 이는 발전소 부근에서는 내륙 약 7 km 지점에 위치한 삼대봉 등의 산 서쪽 사면에서 발달한 곡풍의 영향으로 해풍의 내륙진입이 방해받는 것으로 판단된다. 그후 21시부터는 해안의 해풍이 현저히 약화되어 그 이후 육풍으로 다시 전환되는 모습을 볼 수 있다.

2.2.2 해륙풍의 연직구조

동해안에서의 해풍은 동풍계열이고 육풍은 서풍계열이므로 해륙풍의 발달 및 연직구조를 알기 위해서는 동서방향 성분 바람의 연직구조를 살펴보면 된다. 그림 4는 발전소를 지나가는 동서방향의 연직단면(cross-section)에서 동서 바람성분의 연직구조의 시간에 따른 변화양상을 나타낸 것이다. 야간에서 09시 이전까지 해안에서는 서풍(육풍)이 50 m 고도까지 나타나고 있었으나 09시에는 해안선 부근 아주 얇은 층에 동풍(해풍)이 나타나 낮시간이 진행됨에 따라 그 층의 두께도 점차 두터워지면서 내륙으로 진입해 18시에는 발전소 서쪽에 위치한 산 정상에서 최대강도를 나타낸 후 자정에는 해안가 하층부터 다시 육풍이 나타나기 시작하였다.

연직 동서성분 바람구조를 보면 해풍의 내륙 진입거리를 알 수 있는데 해풍인 동풍이 부는 지역은 사례의 경우에 내륙 약 15 km 까지 나타나고 있으며, 해풍의 영향을 받는 연직층은 15시에 삼대봉 정상 부근에서 최대 1.5 km 까지 나타나고 있고 전반적으로는 약 600~700 m 까지 형성되는 것을 볼 수 있다.

또한 해륙풍과 산곡풍이 뚜렷이 구분되어 나타나는 것을 볼 수 있는데, 국지순환이 가장 잘 발달한 18시의 결과를 보면 산의 경사에 따라 해안지역에서는 해풍인 동풍이, 내륙지역에서는 산의 동쪽 사면이나 서쪽 사면이나에 따라 곡풍이 동풍, 서풍으로 확연히 구분되는 것을 볼 수 있다.

2.2.2 모델링 결과와 관측치의 비교

모델의 특성을 분석하기 위해 월성원전과 인접해 있는 포항과 울산의 기상청 관측소에서 5년간(1988~1992년) 관측한 바람자료와 관측지점에서 가장 인접한 격자점의 모델링 결과를 비교해 보았다.

그림 5는 포항과 울산관측소에서 모델링 사례와 같은 조건이었던 날의 풍향·풍속의 평균 일변화와 관측소 인접 격자점에서 얻은 모델 풍향·풍속의 일변화를 나타낸 것이다. 포항에서는 해풍(동풍계열)의 시작시각과 풍속은 대체로 잘 일치하나 모델링 결과가 더 오래 해풍이 지속되는 양상을 보이고 있으며, 울산에서는 모델링 결과가 관측보다 늦게 해풍이 발달하고 있으며 풍속은 약 10% 정도 약하게 모의되고 있다. 또한 포항과 울산 모두 육풍과 해풍의 풍향교체시 풍향이 다소 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

이러한 현상은 모델값은 단위 격자망 내의 평균값이고 또한 격자간격 3 km 이내의 지형 조건을 반영할 수 없기 때문에 나타나는 것으로 특히 바람의 변화가 심한 풍향 교체시에는 서로 반대되는 풍향을 평균하게 되는 경우가 생겨 풍속이 약화될 뿐만아니라 풍향에서도 오차가 발생하게 된다. 또한 모델에서는 지형고도를 단위 격자망 내의 평균값을 사용하기 때문에 산의 높이가 낮게 입력되어 지형의 경사도도 실제보다 작아지게 된다. 따라서 해풍의 에너지원인 태양에너지가 일출시에는 실제보다 적게, 일몰시에는 더 많이 입사되는 것으로 계산되어, 해풍의 발달 및 소멸시각이 지연되는 것으로 판단된다.

3. 토 의

같은 사례에 대해 동일한 초기조건을 사용하여 15 km의 성긴 격자계로 모델링한 결과[3]와 비교해 보면 성긴 격자계에서는 발전소 서쪽 내륙 약 7 km 지점에 위치해 있는 삼대봉 등의 지형조건이 반영되지 않아 해풍이 울산 북서쪽 내륙의 가지산 서쪽사면의 곡풍과 결합

되어 내륙 약 60 km 까지 진입하는 것으로 모사되었으나, 미세 격자계에서는 삼대봉 등의 지형에 의해 발생한 곡풍의 영향으로 내륙 진입거리가 약 15 km 이내로 제한되어 나타나고 있다. 이런 결과는 월성원전 주변지역에서 실시한 1995년 봄철 특별상층관측[5]에서 해풍 진입거리가 약 10~15 km인 것과 잘 부합되고 있어 미세 격자계 모델이 성긴 격자계 모델에 비해 해륙풍 영향범위를 더 정확하게 모사하는 것을 알 수 있다. 또한 성긴 격자계 모델에서는 해안지역에서 발생한 해륙풍과 내륙지역에서 발생한 산곡풍이 병합되어 나타났으나 미세 격자계 모델에서는 이런 국지순환이 뚜렷이 구분되어 나타나고 있다.

또한 포항, 울산지역에서 관측된 값과의 비교에서도 나타났 듯이 모델링에 사용된 지형조건은 해륙풍의 발달·소멸시간의 예측에도 영향을 주기 때문에 가능한한 세밀한 지형조건을 모델링에 반영하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 원전에서 방출된 방사성 물질이 주변환경 및 주민들에게 미치는 영향을 보다 정확히 평가하기 위하여 가우시안 모델의 한계를 극복하고 지형이 복잡한 해안지역에서 빈번히 발생하는 해륙풍 등의 국지순환을 반영할 수 있도록 삼차원 미세 격자계 해륙풍 모델을 개발하여 봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날에 대하여 모델링하였다.

모델링 결과 사례의 경우에 월성원전 주변에서 발생한 해풍은 내륙 약 15 km 까지 진입하고, 연직적으로는 최대 약 1.5 km, 전반적으로는 약 600~700 m 정도 발달하는 것으로 나타났다.

또한 성긴 격자계와 미세 격자계 모델링 결과의 비교에서 격자간격을 작게하여 보다 세밀한 지형조건을 반영하는 것이 바람직하다는 것을 확인하였으나, 관측값과의 비교에서는 격자간격 3 km의 미세 격자망으로는 해륙풍의 발달·소멸시간 등에 대한 모사에는 다소 미흡한 것으로 나타났다.

그러나 모델 격자간격을 줄여 좀 더 세밀한 지형효과를 반영하는 것은 계산시간 및 비용 등의 경제성에 한계가 있기 때문에, 향후에는 관측치를 모델에 동화(assimilation)시켜 격자간격을 줄이지 않고도 관측값과의 오차를 최소화할 수 있는 방법을 연구할 것이다.

참 고 문 헌

1. Atkinson, B. W., *Meso-scale Atmospheric Circulation*, Academic Press, London, pp125, 1981.
2. US NRC, Methods for Estimating Atmospheric Transport and Dispersion of Gaseous Effluents Routine Releases from Light Water Reactor, *Reg. Guide 1.111*, 1977.
3. 이갑복, 손순환, 월성원전 부지의 해륙풍 모델링 및 특성분석, *한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집*, Vol. 4, 107-112, 1996.
4. Park, S. U., Results of a Three Dimensional Numerical Model of Land-Sea Breezes over South Korea, *J. of Kor. Meteor. Soc.*, 26(2), 78-103, 1990.
5. 이갑복 외, 월성원전 부지 주변지역의 봄철 해륙풍 특별상층관측, *한국원자력학회 추계학술발표회 논문집*, Vol. 2, 611-616, 1996.

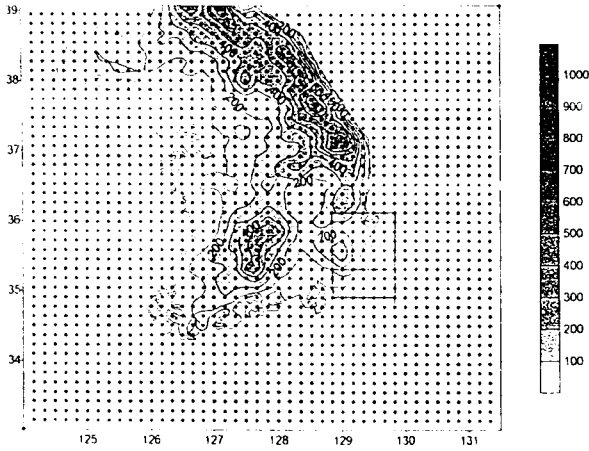


그림 1. 월성원전 주변지역에 대한 삼차원 해륙풍모델링 영역과 성긴 격자계 모델링에 사용된 지형 (월성원전 부근의 실선 사각형은 격자간격 3 km인 미세 격자계 모델링 영역)

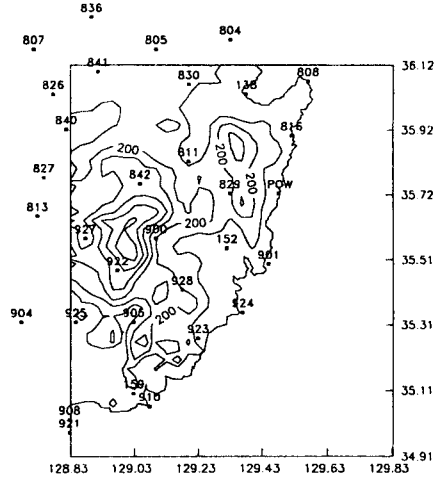


그림 2. 격자간격 3 km인 미세 격자계 모델링에 사용된 지형(그림의 POW는 월성원전, 숫자는 기상청 기상관측소 번호이고, 152는 울산, 138은 포항을 나타냄)

표 1. 성긴 격자계 모델 초기조건

Horizontal grid interval	15 km
Horizontal grid size	46 X 46
Vertical levels	13
Time step	10 s
Integration initialization	0600 LST
Mean Latitude	36.5 °N
Solar declination	3.6 °
Geostrophic wind speed	2.8
Geostrophic wind direction	356 °
Land surface characteristics	
Initial surface pressure	1015.2 mb
Albedo	0.2
Roughness length	5 cm
Sea surface temperature	282.2 °K
Free atmospheric potential temperature gradient	4 °K/km
Land surface temperature	281.15 °K
Soil characteristics	
Density	1.21 g/cm
Diffusivity	0.005cm ² /s
Surface wetness	0.3
Depth of constant soil temperature	20cm
Constant soil temperature	282 °K
Saturation soil moisture	0.5

표 2. 미세 격자계 모델 초기조건.

Horizontal grid interval	3 km
Horizontal grid size	31 X 46
Vertical levels	14
Time step	7.5 s
Integration initialization	0600 LST
Mean Latitude	35.7 °N

주) 이 표에 수록되지 않은 입력변수들은 표 1의 성긴 격자계에서의 조건과 동일

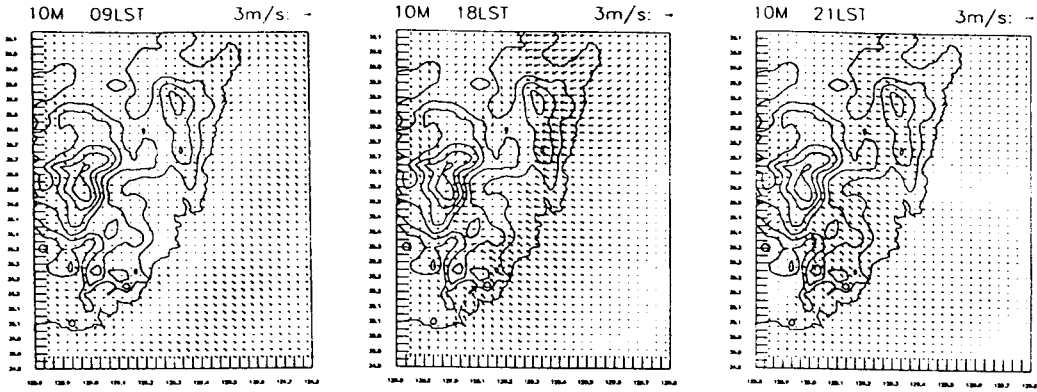


그림 3. 봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날의 경우에 대한 미세 격자계 해륙풍 모델링 결과의 10 m 고도에서의 수평바람 분포. 좌측부터 각각 09, 18, 21시의 결과.

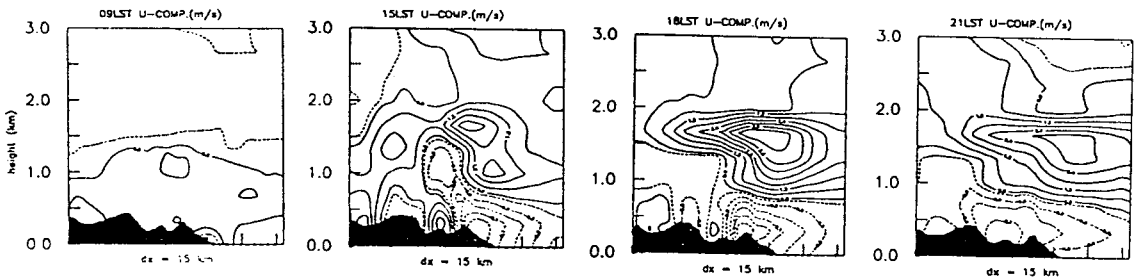


그림 4. 발전소를 지나는 동서방향의 연직단면에서의 동서 바람성분의 연직구조의 시간에 따른 변화. 좌측부터 각각 09, 15, 18, 21시의 결과

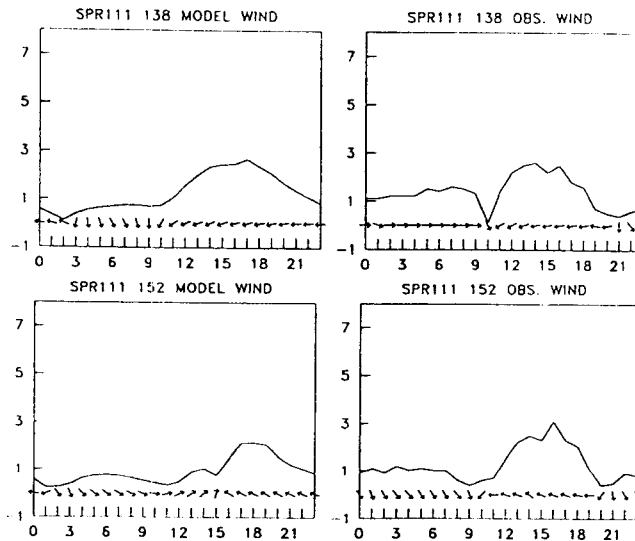


그림 5. 봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날의 경우 포항(위), 울산(아래) 기상청 관측소에서 5년간(1988 ~ 1992년) 관측된 평균바람(오른쪽)과 미세 격자계 해륙풍 모델링 결과 바람(왼쪽)의 일변화