

바람장의 공간적 · 시간적 해상도가 누출물질 확산에 미치는 영향

Effects of Spatio-Temporal Resolution of Diagnostic Wind Field on the Dispersion of Released Substance

김영성 · 김병욱 · 오현선 · 김진영 · 김종수

한국과학기술연구원 지구환경연구센터

(1999년 12월 3일 접수, 2000년 5월 2일 채택)

Young Sung Ghim, Byeong-Uk Kim, Hyun Sun Oh,
Jin Young Kim and Jong-Soo Kim

Global Environment Research Center, Korea Institute of Science and Technology

(Received 3 December 1999; accepted 2 May 2000)

Abstract

Complexity in atmospheric environment, coupled with shoreline and complex terrain, often causes local variations of meteorology, that are distinct from those representative over larger surrounding area. These kinds of local variations are less significant in usual long-term environmental impact analyses dealing with continuous plume. The variations could, however, be crucial in predicting dispersion of toxic substance released in a relatively small area for a short duration. In the present paper, the effects of spatial and temporal resolution of diagnostic wind field on the dispersion of the released substance are investigated by using a puff model. A hypothetical release scenario assumes that a substance is released from a location in the Yochon Industrial Estate, and passively dispersed within a few-kilometer distance for an hour. The results show that diagnostic analysis could resolve more spatial variations to some extent by employing smaller grid size. The peak concentrations and puff trajectories, obtained from spatially- and/or temporally-varying diagnostic wind fields, are found appreciably different from those obtained from uniform wind field. Attention to high-resolution wind field in the both spatial and temporal spaces is called in the consequence analysis of toxic substance release.

Key words : toxic substance release, diagnostic wind field, spatial/temporal resolution, passive dispersion

1. 서 론

석유화학 공장들이 밀집된 여천산업단지는 화학 물질 누출/확산 사고의 잠재적 위험이 높은 지역이다(김영성 등, 1999). 그러나 복잡한 해안선의 여수

반도 해안지역에 산을 등지고 있어 해륙풍에 의한 일변화와 지형 조건에 따른 바람의 국지 변화 등으로 바람의 변화가 복잡하여질 경우 사고 예측이 간단치 않다. 실제 오현선과 김영성(2000)은 수치모델 실험에서, 맑은 날 일출을 전후하여 산업단지를 중심으로 대기순환이 바뀌면서 바람의 정체와 함께

복잡한 풍향 변화가 나타나면 대부분의 지역에서 오염물질의 농도가 높아짐을 보여주고 있다.

유독물질 누출사고 예측은 (1) 독성에 따라 몇 분간의 노출로도 충분히 치명적일 수 있으므로 시간적으로 상세하여야 하고, (2) 낮은 농도에서도 위해할 수 있으므로 바람의 변화가 복잡할 경우 공간적으로 상세하여야 한다. 유독물질의 취급량은 대개 독성에 반비례하며, 이에 따라 아주 대형사고가 아닌 한 대부분 사고가 수 십분 내 종결되며, 영향 반경도 수 km를 넘지 않는다(김영성 등, 1999). 분 단위, km 단위 이내의 변화를 구분할 수 있어야 하나 대기환경 분야 대부분의 모델은 시간 단위, 수 km 이상의 변화를 대상으로 하고 있다.

평탄한 지형 등 지형조건이 단순한 일부 경우를 제외하고, 확산 예측이 어려운 것은 주로 비선형성이 강한 바람장 때문이다. 공간적, 시간적으로 변화하는 바람 자료는 예측(prognostic) 모델이나 진단(diagnostic) 모델을 이용하여 얻을 수 있다. 이론적으로 예측모델은 어떠한 해상도의 자료도 얻을 수 있으나 실제에 있어서는 모델에 포함된 여러 가정으로 말미암아 짧은 시간, 수 100 m 규모의 대기 순환 예측에는 어려움이 적지 않다. 또한 해상도를 높일수록 모사 시간이 증가하는 등 모델 이용에 필요한 투자가 기하급수적으로 커지는 것도 큰 단점이다. 진단모델은 관측치에 대한 의존도가 크다는 절대적 단점에도 불구하고, 역으로 관측치가 제공되는 한 어떠한 해상도의 자료도 값싸고 빠르게 얻을 수 있다는 장점이 있다. Kumar와 Russell(1996)이 진단모델의 정확도가 예측모델보다 낮다고 평가한 것도 남가주지역의 기상 관측이 진단모델 이용을 뒷받침하고 있기 때문이다.

수 분 단위, 수 백 m 규모의 대기순환을 예측모델을 이용하여 예측하는 것은 짧은 시간에 가능한 작업이 아니므로 본 연구에서는 (1) 진단모델을 이용하여 분 단위, km 규모 이하의 바람장 구성을 시도하고 특성을 알아보았으며, (2) 이와 같은 바람장 구성이 유독물질 확산 예측에 어떠한 영향을 미치는가를 조사하였다. 공간적, 시간적으로 상세한 바람장을 얻기 위하여 분포가 조밀한 자동기상 관측자료를 이용하였으며, 확산은 사용이 간편한 퍼프모델을 이용하여 예측하였다. 연구의 초점이 바람장의 변화에 따른 유독물질의 이동/확산에 맞추어진 까닭에

대기와 동일한 성질의 물질이 누출되고 확산되는 수동 확산만을 대상으로 하였고, 따라서 누출사고 모델에서 중요한 누출원 주변의 변화와 증기운 확산은 본 연구에서 고려되지 않았다(정수희 등, 1999; AICHe/CCPS, 1996).

2. 모델링 방법

2.1 대상 영역

여천공단을 포함한 여천군 일대 20 km×20 km의 영역을 유독물질 확산 조사 대상 영역으로 선정하였고 사고 지점은 영역 중앙부근의 서남지역공업단지 관리공단부근 위치를 가정하였다(그림 1). 사고 지점 주변으로는 남동쪽으로 높이 400~500 m의 낮은 산지가, 북쪽으로는 광양만이 위치하고 있으며, 따라서 해륙풍과 지형 조건에 의한 다양한 변화를 예상할 수 있다.

2.2 모델 이용

바람장 구성을 위하여 이용한 진단모델은 3차원 오일러리안 대기질 모델인 CIT (California Institute of Technology) 모델의 일부분으로 (McRae *et al.*, 1992), 기본 특성은 UAM (Urban Airshed Model)의 DWM (Diagnostic Wind Model; Douglas *et al.*, 1990) 과 동일하다. 유독물질 확산을 조사한 INPUFF (Gaussian INtegrated PUFF; Petersen과 Lavdas, 1986)는 퍼프 모델로서 수십 m부터 수십 km까지의 이동과, 수분간의(증기운 확산이 포함되지 않는 일반) 누출사고부터 연속 플룸까지를 취급할 수 있으며, 기상조건인 시간적, 공간적 변화를 수용할 수 있다.

2.3 기상관측자료 이용

진단모델을 이용하여 바람장을 구성할 때에는 잘 검증된 정규 기상관측자료를 이용하는 것이 보통이다. 그러나 그림 1의 본 연구 대상영역과 같이 영역의 크기가 수 km 혹은 수십 km일 때에는 영역 안이나 주변지역에 정규 기상관측소가 위치하기 쉽지 않으므로 보다 분포가 조밀한 자동기상관측소(AWS, Automatic Weather Station) 자료를 이용할 수밖에 없다. 그러나 김진영 등(2000)이 이미 지적한 바와 같이 AWS 자료를 이용하기 위해서는 우선 자료 검증이 필요하다. 김진영 등(2000)이 1996년과

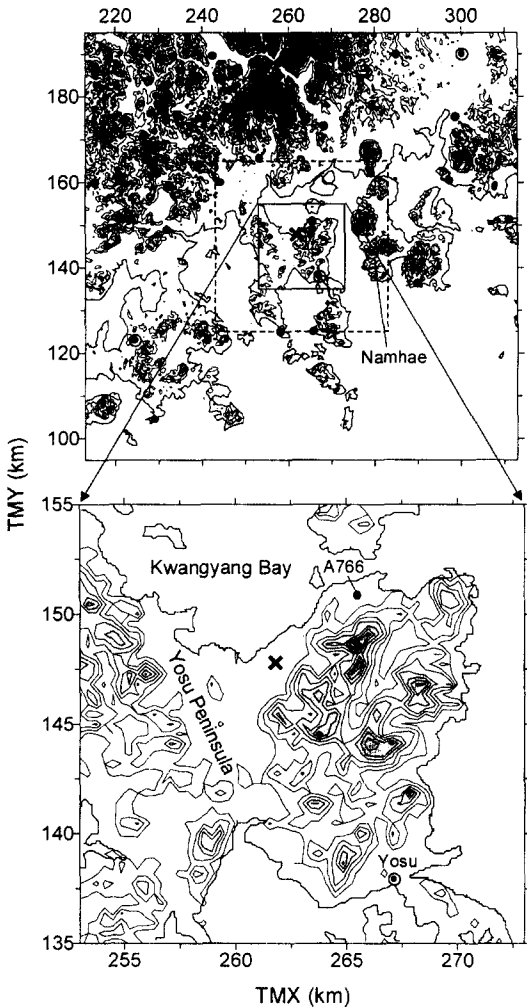


Fig. 1. Location of the Yosu Peninsula and modeling domains including topographic features. The domain of 20 km × 20 km in the lower figure shows the dispersion modeling domain; the domain of 40 km × 40 km represented by the dashed line in the upper figure shows the wind field domain. Wind field was estimated by using the measurements from both surface weather stations (denoted by solid circle surrounded by open circle) and automatic weather stations (denoted by solid circle) over the domain of 100 km × 100 km in the upper figure. The source location is designated by a cross symbol.

1997년 서울, 인천지역 AWS 자료를 검토한 바에 의하면 특히 서울의 경우 1996년 자료는 정규 지상

관측자료와의 편차가 심하여 이용이 곤란하였던 반면 1997년 자료는 소수의 이상치를 제외한다면 이용이 가능하였다. 이에 따라 그림 1의 18개 AWS의 1997년 자료에 대하여 김진영 등(2000)과 같이 크기별 분포와 자료의 반복성을 조사하였는데, 자료 결핍율 11%, 이상치 비율 3% 등 자료 회수율이 86%로 나타나, 서울, 인천지역의 각각 88%, 76%와 유사하였다(김종수 등, 1999).

2.4 바람장 구성

Kim *et al.* (2000)은 정규 지상관측자료를 이용하여 그림 1과 유사한 100 km × 100 km 영역에 대하여 5 km 격자 간격으로 바람장을 계산하고자 할 때 유효한 바람장을 얻기 위하여서는 영역 내 5개 지상 관측 자료와 함께, 최소한 사방으로 30 km씩 넓게(관측자료를 이용하되 바람장은 계산하지 않는) 준비영역을 설정하여 충분한 자료를 이용할 것을 권장하였다. 본 연구에서는 그림 1의 확산 조사 대상영역보다 가로, 세로가 각각 2배인 40 km × 40 km의 영역에 대하여 바람장을 구성하였는데, (1) 풍속과 누출시간에 따라서는 그림 1의 20 km × 20 km의 영역이 충분치 않을 수 있고, (2) 여수반도를 포함한 주변 바람장의 전체적 모습을 살피기 위해서는 최소한 이 정도의 영역이 필요하다고 판단되었기 때문이다. 그러나 40 km × 40 km 영역도 통상의 기상모델 영역보다 매우 좁고, 앞에서도 언급한 바와 같이 격자 간격으로 최대 1 km를 고려하고 있으며, 기상 관측 자료도 정규 지상관측자료보다 훨씬 조밀한 AWS 자료를 이용하게 되므로 Kim *et al.* (2000)의 방법을 따를 경우 준비영역이 10여 km 정도로 현저하게 줄어들 것을 예상할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 계산에 큰 부담이 되지 않는 한 준비영역을 충분히 설정한다는 생각 아래 그림 1의 100 km × 100 km 영역의 관측자료를 이용하여 필요한 영역의 바람장을 계산하였다. 이에 따라 관측자료가 영향을 미치는 범위를 정하는 영향 반경 역시 충분히 넓게, 대략 100 km × 100 km 영역의 중앙에서 대각선 끝까지 70 km로 설정하였다.

2.5 모사실험

공간적으로는 통상의 2~5 km 대신 1 km, 500 m, 200 m, 100 m의 미세 격자를 시험하였고, 시간적으

로는 1시간 동안 바람장이 일정한 경우와 10분 간격으로 변하는 경우를 비교하였다. 10분 단위 바람장은, 측정소 별로 1시간 단위 측정치를 spline 내삽하여 10분 단위 측정치를 구한 후 진단모델을 이용하여 산출하였다. 측정치의 내삽과정에는 다음과 같은 몇 가지 원칙을 적용하였다. (1) 내삽과정에서 음(negative)의 풍속은 0으로 처리한다. (2) 내삽에 사용되는 풍향 관측치는 0부터 540°까지 언제나 차이가 작은 방향으로 계산한다. 즉, 315°에서 45°로 변할 때는 45°를 405°로 변환시켜 사용하며, 그림 2는 풍향 내삽의 한 예이다. (3) 자료가 결측일 때에는 이를 필요로 하는 모든 10분 단위 계산을 결측 처리한다.

유독물질은 서론에서도 언급한 바와 같이 대기과 같은 성질을 지닌 물질이 주변 대기과 같은 온도로 누출되는 것을 가정하였다. 그림 1의 사고지점 지상 2.6m 높이에서 10분간 수직으로 위를 향하여 지름 1m의 누출구를 통하여 1.8m/s로 누출되는 것을 가정하였으며, 10분 동안 누출된 유독물질의 총량은 약 1톤이다. 대기안정도는 PCRAMMET (USEPA, 1998)의 방법에 따라 여수 기상관측소 자료를 이용하여 3시간 간격으로 결정하였고, 혼합고는 ISC의 시간별 혼합고 추산법에 의하여 (USEPA, 1992) Chang *et al.* (1997)의 광주지역 계절별 최대, 최소 혼합고 자료로부터 산출하였다. 당초의 INPUFF는 수용체를 100개까지 지정할 수 있으나 20 km × 20

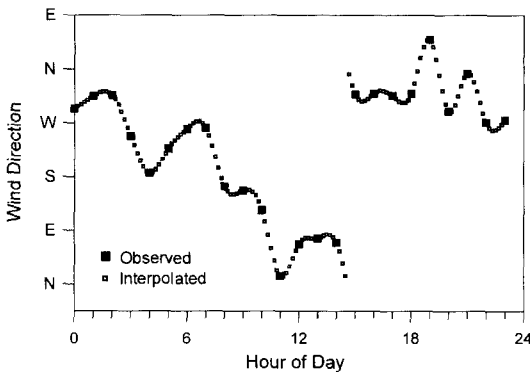


Fig. 2. Cubic-spline interpolation of hourly-based wind direction data at 10-min intervals. The discontinuity at 15:00 is caused by normalizing the wind-direction angle, which is limited from 0° to 540°.

km 영역에서 100 m 격자 단위로 농도를 계산하기 위하여 40,000개로 최대값을 증가시켰다.

3. 대상조건의 선정

대상조건은 그림 1에서 볼 수 있는 것과 같이 사고 지점에서 가장 가까운 자동기상관측소인 A766의 1997년 측정 자료 중 바람장의 공간적, 시간적 해상도가 중요할 것으로 예상되는 다음 세 경우로부터 선정하였다.

- (A) 풍향의 변화가 심한 경우
- (B) 풍속의 변화가 심한 경우
- (C) 지형의 영향이 큰 경우

사례 (A), (B)는 A766의 1997년 1년간 모든 측정 자료를 대상으로 매 1시간 간격으로 풍향, 풍속 변화를 계산하여 비교적 변화가 큰 경우를 찾아 이상 여부를 검토한 뒤, 전체 23개 관측소 자료 중 결측 혹은 이상치가 3개 이하인 경우를 1차 선정하였다. 1차적으로 선정된 경우에 대해 전후 1~2시간 40 km × 40 km 영역의 바람장을 관찰하여 원하는 목적에 해당하는지를 확인한 후 최종 선택하였다. 사례 (C)는 사례 (A), (B)로써 1차 선정된 경우 중 풍향이 산지 지형을 향하여 지형의 영향이 클 것으로 예상되는 사례를 선정하였다. 최종적으로 선정된 사례는 (A)의 경우 5월 7일 8~9시, (B)의 경우 6월 22일 18~19시, (C)의 경우 4월 23일 23~24시였다.

그림 3은 사고지점을 중심으로 한 여수반도와 주변지역의 사례별 바람장의 모습이며 그림 4는 사례 전후 12시간의 풍향 및 풍속 변화이다. 사례 (A)는 5월 7일 아침 해풍이 발달하는 과정에서 사고지점 주변의 풍향이 남서풍에서 북동풍으로 180° 변한 경우이다. 그림 4(a)를 보면 이날 아침 내내 A766의 풍향 변화가 심한데, 그림 1에서 기상관측소 위치를 확인하여 보면 여수와 남해기상 관측소는 물론 AWS가 위치한 남쪽과 북동, 북서쪽의 풍향 변화가 크지 않아 사례 (A)의 풍향 변화가 A766에 국한된 국지 변화임을 짐작할 수 있다. 사례 (B)는 6월 22일 저녁 해풍이 감소하는 시점에서 사고지점 주변의 풍속이 거의 정체로부터 3 m/s 가까이 빨라진 경우이다. 그림 4(b)만을 보면 13~14시의 풍속 변화가 더 크나 앞에서 언급한 것과 같이 주변 지역 관측소의 자료 회수율이 낮아 18~19시가 선택되었

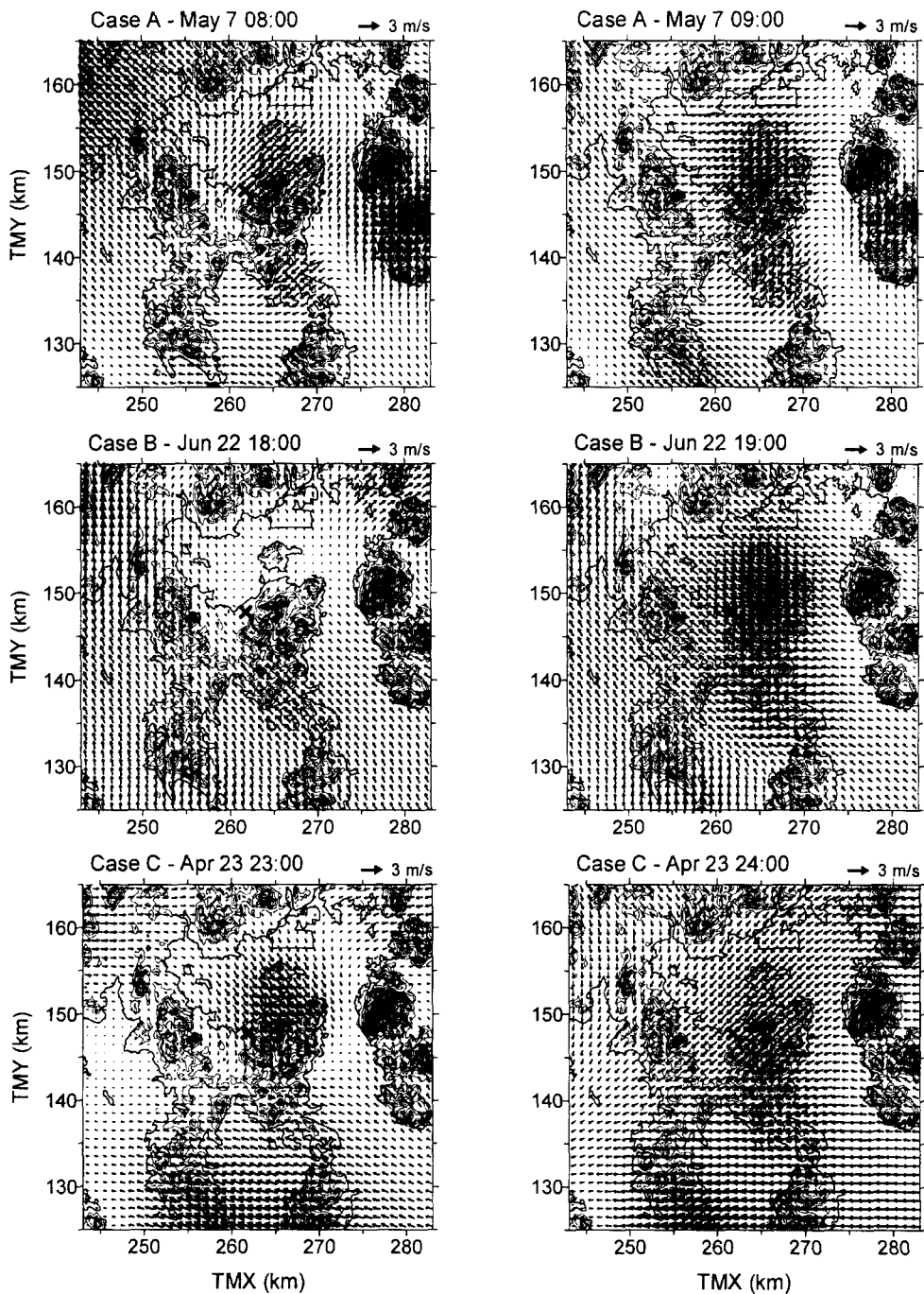


Fig. 3. Diagnostic wind fields of Cases A, B, and C in 1997. Case A corresponds to the case with large wind-direction variation near the source for an hour after release, while Case B corresponds to large wind-speed variation. Case C was chosen as the case, in which the terrain effect is expected to be large among the cases where variation of wind direction or wind speed is large.

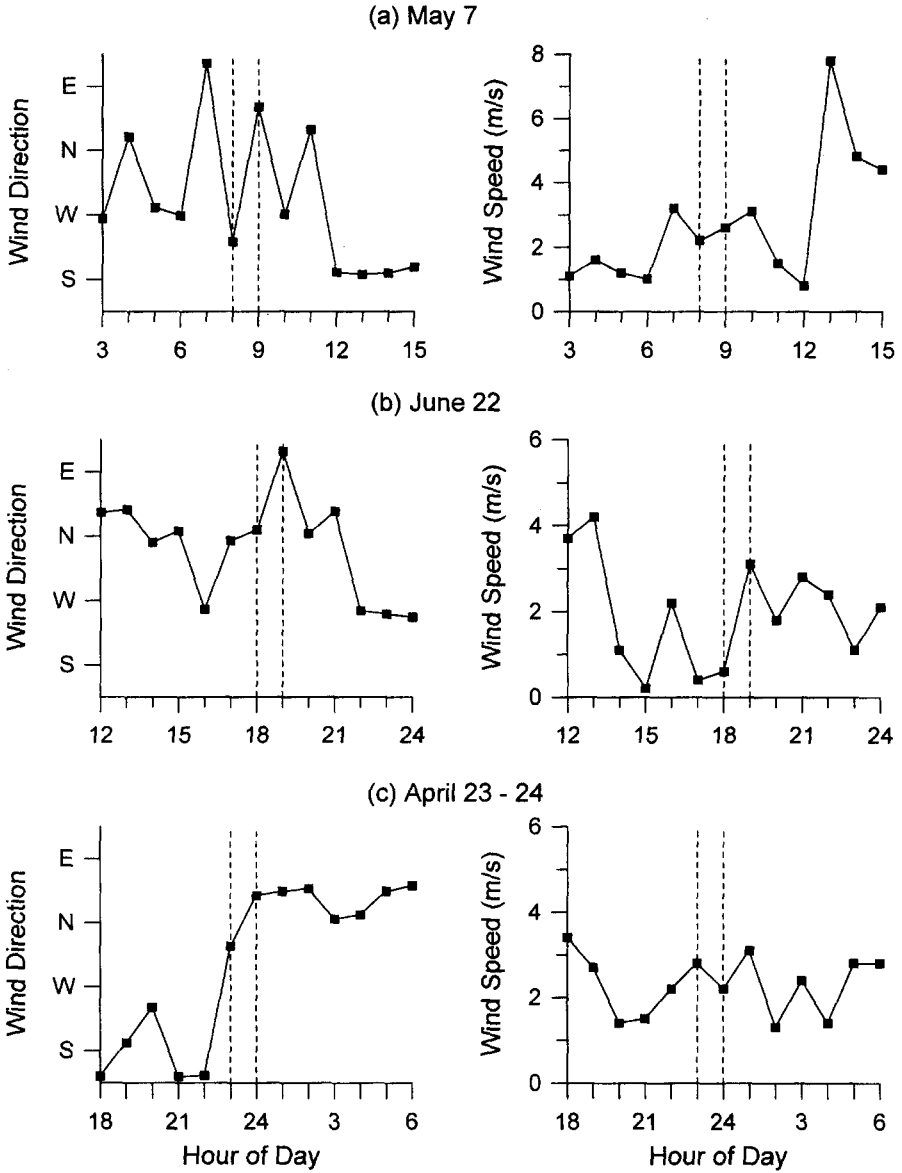


Fig. 4. Variations of wind speed and wind direction observed at A766 for 12 hours centering around Cases A, B, and C. See Fig. 1 for the location of A766. Case A corresponds to the variations from 08:00 to 09:00 on May 7, 1997; Case B, 18:00 to 19:00 on June 22; and Case C, 23:00 to 24:00 on April 23.

다. 그림 4(b)를 보면 19시 이후 높아진 풍속이 어느 정도 유지되고 있으며, 그림 3을 보면 남해의 풍속이 낮아지면서 여수 관측소의 풍속이 높아졌다. 19시에는 오히려 산지에서의 풍속이 빠르나 18시에는 남동풍이 산지를 만나 발산되며 사고 지점에 폭

넓게 정체 지역이 형성되었다.

사례 (C)는 4월 23일 자정 가까이 남해로부터 불어오던 해풍이 육풍으로 전환되는 시점에서(그림 4(c)) 사고지점 주변의 풍향이 북북서에서 북동으로 바뀐 경우이다(그림 3). 그림 4(c)를 보면 1시간 동

안 풍향, 풍속 변화는 크지 않으나 풍향이 산지를 마주하며 변함에 따라 누출물질의 이동도 지형의 영향을 크게 받을 것으로 예상되는 사례이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 격자 크기의 영향

김진영과 김영성(1999)은 정규 지상관측 자료만을 이용하였을 때보다 훨씬 상세한 AWS 자료를 함께 이용하였을 때 대상지역 바람장의 공간 변화 폭이 커지는 것을 발견하였다. 그러나 이는 기본적으로 AWS 자료의 변화 폭이 정규 지상관측 자료보다 컸기 때문이다. 동일한 위치에서의 값들을 비교할 때 측정치의 공간변화는 측정치의 내삽으로부터 출발하는 진단모델 계산치의 변화보다 크다(Kim *et al.*, 2000). 그림 5는 그림 1의 20 km×20 km 영역에서 격자 크기를 줄였을 때 영역 내 최대, 최소, 평균 풍속 변화를 살펴본 것이다. 사례별로 조금씩 차이

가 있으나, 동일한 측정치를 사용하였음에도 격자 크기가 작아질수록 최대 풍속은 커지고, 최소 풍속은 작아지는 경향을 볼 수 있다. 반면 평균 풍속은 거의 변화가 없다. 김진영과 김영성(1999)은 동일한 영역에서 측정치가 많을 때 공간 변화 폭이 커지는 것은 주로 측정치의 영향 때문으로 보았다. 그러나 그림 5에서는 대상영역의 격자의 크기가 줄이는 것만으로도 계산치의 변화 폭이 커지고 있는데, 격자 크기가 줄어들수록 계산점의 수가 증가하여 보다 세밀하게 지형자료를 이용할 수 있게 됨에 따라 나타난 현상으로 해석된다.

그림 6에서는 그림 5의 바람장의 변화가 누출물질의 이동, 확산에 어떠한 영향을 미치는가를 조사하였다. 즉, 바람장의 해상도를 높였을 때 누출물질의 이동, 확산이 어떻게 변하는가를 알아보기 위하여(누출시간 10분을 포함한) 누출시작 1시간 후 100 m 간격으로 배치한 수용처의 최고농도와 1시간 동안 최고농도 위치에서의 평균 풍속(매 10분마다

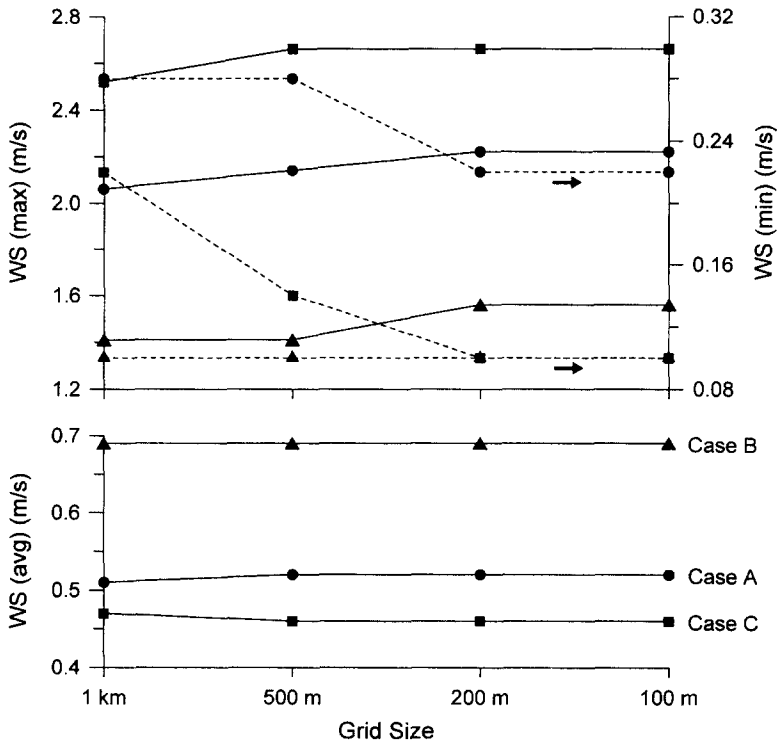


Fig. 5. Variations of the maximum, minimum and average wind speeds in the dispersion-modeling domain with decreasing grid size of diagnostic wind field at the starting point of each case.

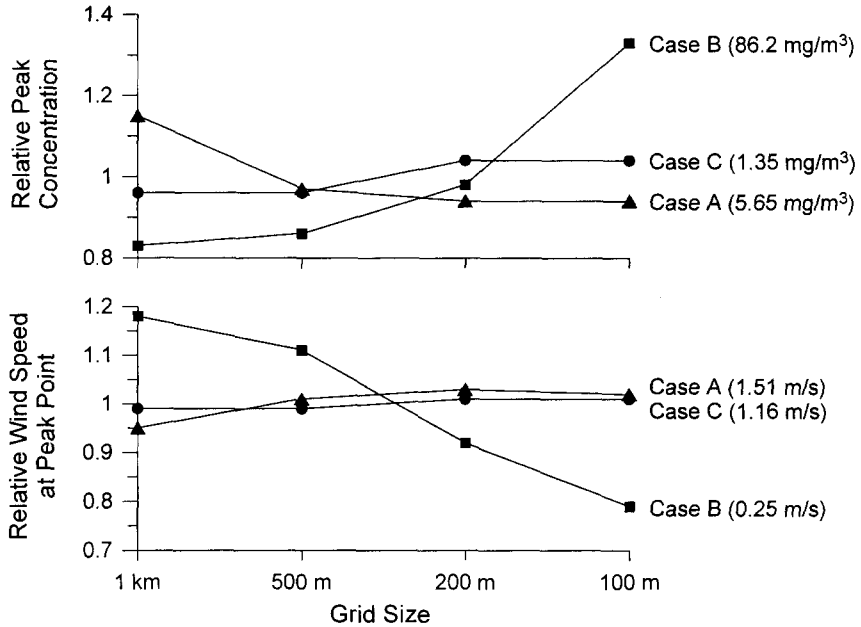


Fig. 6. Peak concentration of puffs after one hour from the start of release and the average wind speed at the location of peak concentration for that hour, as a function of grid size of diagnostic wind field. Constant wind field was assumed for an hour. Wind speed at the location of peak concentration was identified at 10-min intervals. Values relative to the mean values for each case, shown in the parentheses, are compared.

조사한 6개 최고농도 위치에서의 평균풍속)을 살펴 보았다. 같은 조건에서 변화를 비교하기 위하여 격자 크기별 값을 다음과 같이 평균치로 나눈 상대값을 비교하였다.

$$\text{Relative Value} = \frac{\phi_G}{\sum \phi_{G/4}}$$

G = 1 km, 500 m, 200 m, and 100 m

ϕ 는 그림 6의 최고농도와 평균풍속이며 기준이 되는 평균값은 그림 오른쪽에 사례별로 표시하였다.

먼저 최고농도를 살펴보면 사례(A)에서는 격자 크기가 작아질수록 최고농도도 낮아진 반면 사례(B)에서는 격자 크기가 작아지면서 최고농도가 큰 폭으로 증가하는 등 사례에 따라 변화가 다르다. 변화폭도 사례(A) 0.21, 사례(B) 0.5, 사례(C) 0.08로 차이가 크다. 주로 최소 풍속의 경우지만, 그림 5에서 풍속 변화가 컸던 사례(C)의 최고농도 변화가 가장 작고, 풍속이 거의 일정하였던 사례(B)의 최고농도 변화가 가장 큰 것도 의외이다. 그러나 아래

그림의 궤적에 따른 평균풍속을 보면 일면 당연하지만 이와 같은 최고농도 변화는 퍼프가 지난 궤적의 풍속 차이 때문이다. 사례(B)에서 최고농도가 큰 폭의 증가를 보인 것은 평균풍속이 큰 폭으로 감소하였기 때문이며, 사례(A)에서 최고농도가 작아진 것도, 사례(C)에서 최고농도가 큰 변화가 없는 것도 평균풍속의 차이 때문이다. 동일한 사실을 기준 평균값에서도 확인할 수 있는데, 사례(B)의 기준 평균풍속이 0.25 m/s에 불과하여 최고농도가 86.2 mg/m³까지 높다.

이와 같은 현상은 기본적으로 누출물질이 바람장의 일부를 지나기 때문이다. 그림 7은 사례별로 격자 크기가 1 km일 때와 100 m일 때 1시간 후의 퍼프의 모습이다. 퍼프의 모습이 거의 유사하나 격자 크기가 100 m일 때가 1 km일 때에 비하여 사례(A)에서는 풍속이 빨라 퍼프가 수백 m를 더 이동하며 최고농도가 낮고, 사례(B)에서는 전체적으로 풍속이 낮은 가운데 퍼프가 더욱 정체되며 최고농도가 높다. 만일 김진영과 김영성(1999)에서와 같이 영역

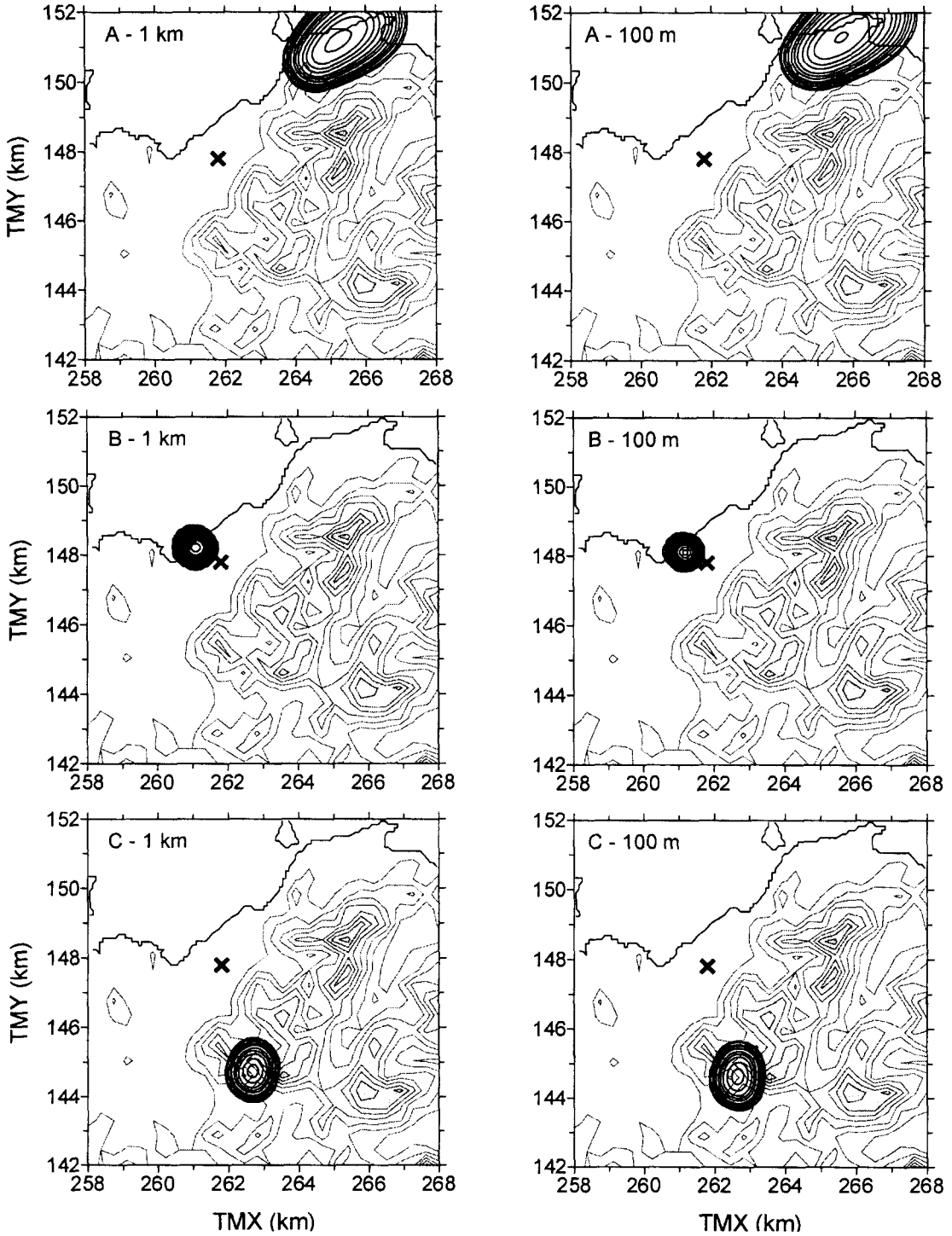


Fig. 7. Movement of the puffs for Cases A, B and C with grid sizes of 1 km and 100 m of diagnostic wind field.

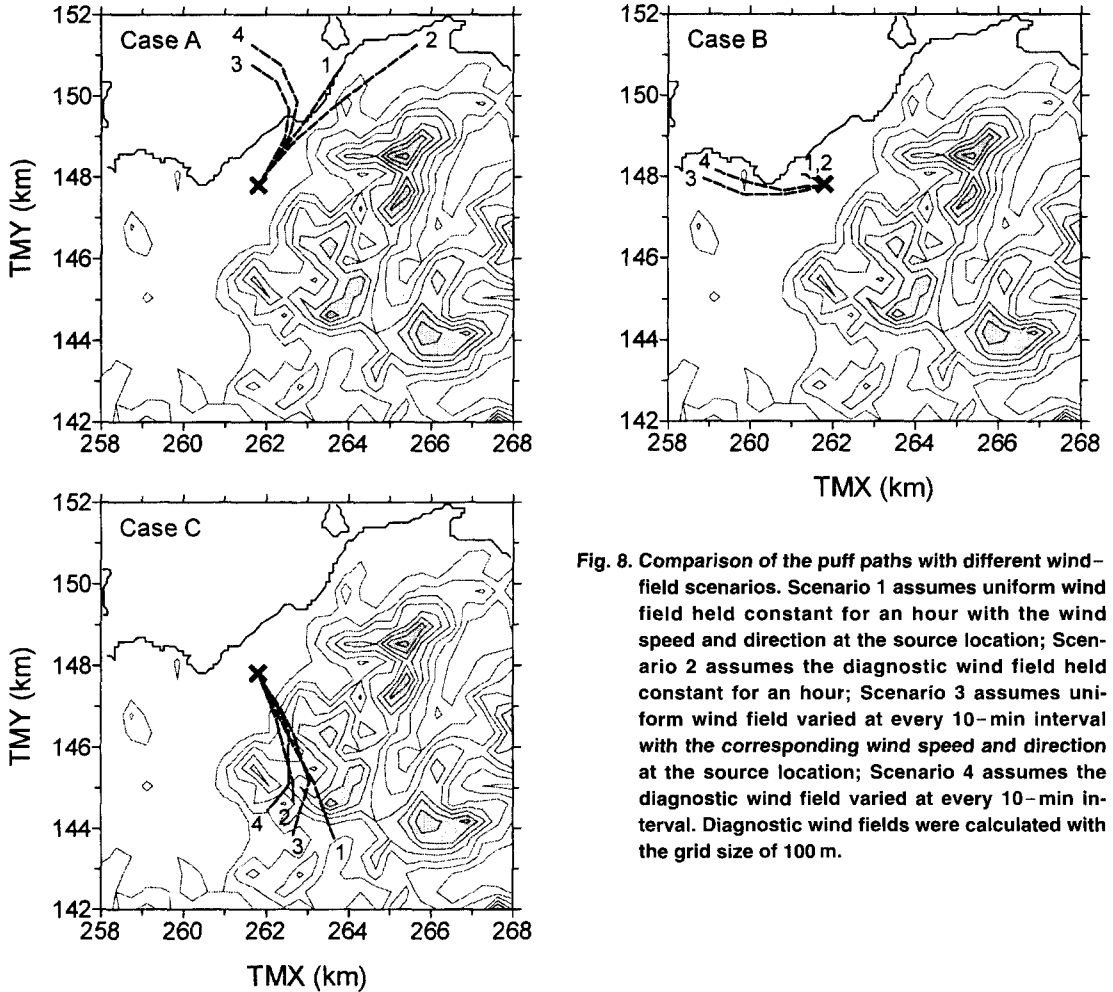


Fig. 8. Comparison of the puff paths with different wind-field scenarios. Scenario 1 assumes uniform wind field held constant for an hour with the wind speed and direction at the source location; Scenario 2 assumes the diagnostic wind field held constant for an hour; Scenario 3 assumes uniform wind field varied at every 10-min interval with the corresponding wind speed and direction at the source location; Scenario 4 assumes the diagnostic wind field varied at every 10-min interval. Diagnostic wind fields were calculated with the grid size of 100 m.

전체의 바람장이 농도 결정에 유효하다면 그림 5에서 격자크기가 작아질수록 영역 내 최소풍속이 감소한 것과 같이 그림 6에서는 균일하게 최고농도가 높아질 수 있다. 그러나 바람장의 일부만이 누출물질의 이동, 확산에 유효함에 따라 그림 6에서는 해당 범위 바람장의 변화 효과만이 드러나고 있다.

4.2 바람장의 공간적, 시간적 변화의 영향

플룸 모델이든 퍼프 모델이든 가장 보편적인 것은 평탄한 지형에서 시간대별 누출원의 풍향, 풍속이 영역 전체에 균일하다고 가정하는 것이다. 앞 절에서는 바람장의 공간 변화를 고려하였으나 1시간

동안 일정한 바람장을 가정하였다. 앞 절의 경우를 포함하여 바람장의 공간적, 시간적 변화에 따라 다음과 같은 4가지 시나리오를 생각할 수 있다.

- (1) 누출원의 풍향, 풍속이 1시간 동안 영역 전체에 균일한 경우
- (2) 진단모델에 의한 바람장이 1시간 동안 동일한 경우
- (3) 매 10분마다 변하는 누출원의 풍향, 풍속이 영역 전체에 균일한 경우
- (4) 매 10분마다 진단모델을 이용하여 바람장을 산출한 경우

이와 같은 구분에 의하면 보통은 평탄한 지형에

Table 1. Peak concentrations after one hour from the start of release (mg/m³).^a

Scenario (Characteristics of Wind Field) ^b	Case A	Case B	Case C
1 (Spatially, temporally uniform field)	16.4	129.0	1.5
2 (Spatially resolved field)	5.3	114.7	1.4
3 (Temporally resolved field)	12.2	1.3	3.1
4 (Spatially, temporally resolved field)	6.0	1.8	4.5

^a The release continues for 10 min. Total amount of release for 10 min is 1 ton.

^b Spatial resolution with grid size of 100 m and temporal resolution with intervals of 10 min.

서 (1)의 바람장을 가정하며, 앞 절에서는 (2)의 경우에 대하여 바람장의 공간적 해상도가 누출물질의 이동, 확산에 미치는 영향을 조사한 것이다.

그림 8은 격자 크기가 100 m일 때 각 사례에 대하여 누출 시작 후 1시간 동안 시나리오별 퍼프 최고농도 위치의 이동 경로를 비교한 것이다. 1시간 동안 공간적으로 균일한 바람장을 가정한 시나리오 (1)의 퍼프 이동이 직선인데 비하여 1시간 동안 동일하지만 공간 변화를 고려한 시나리오 (2)의 이동 경로는, 거의 정체 상태에서 오염된 주변의 바람장에 큰 변화가 없는 사례(B)를 제외하고는 차이가 작지 않다. 시나리오 (3), (4)는 1시간 동안 10분 간격으로 연속하여 바람장이 변하게 되므로 그림 3, 4와 같은 다음 시간 바람장의 영향으로 후반으로 갈수록 시나리오 (1), (2)와 이동 경로의 차이가 커지고 있는데, 이와 같은 경향은 1시간 사이 풍향의 차이가 큰 사례(A)와 풍속의 차이가 큰 사례(B)에서 특히 심하다. 한편 유일하게 누출물질이 산지지형을 향하는 사례(C)에서는 공간 변화를 고려하여 바람장이 지형의 영향을 받는 시나리오 (2), (4)의 경로가 오히려 유사하다.

표 1은 1시간 후 최고농도를 비교한 것이다. 이동 경로 못지 않게 최고농도의 차이도 크다. 특히 1시간 사이 풍속이 크게 높아진 사례(B)의 경우 연속적으로 바람장을 변화시킨 시나리오 (3), (4)의 최고농도는 시나리오 (1), (2)의 1% 수준이다. 반면 사례(C)에서는 바람장을 연속적으로 변화시킴에 따라 최고농도가 2~3배 높아졌다. 1시간 사이 뿐 아니라 영역 내에서도 풍향 변화가 큰 사례(A)에서는 시간 변화보다 공간 변화의 영향이 커서, 바람장의 공간 변화를 고려하였을 때 최고농도가 1/2~1/3 가

량 작다.

5. 결 론

해안선과 지형이 복잡한 대기환경에서는 주변지역의 대표 기상과 별도로 국지 기상 변화가 나타날 수 있다. 연속적인 오염물질 배출을 대상으로 하는 보통의 대기환경영향 평가에서는 이와 같은 국지 변화가 중요하지 않을 수 있으나 유독물질 누출사고와 같이 단시간 내 좁은 영역에서의 변화가 중요할 때에는 상황이 다르다. 본 연구에서는 여천공단이 위치한 여천지역을 대상으로 1시간 동안 수 km 범위의 확산을 가정하여 1시간 동안 풍향, 풍속 변화가 큰 사례와 지형의 영향이 클 것으로 예상되는 사례 등에 대하여 바람장의 공간적, 시간적 해상도가 누출물질의 이동 및 확산에 미치는 영향을 조사하였다. 바람장은 정규 지상관측 자료와 함께 AWS 자료를 이용하여 진단모델로써 구성하였고 오염물질 확산은 퍼프 모델로써 계산하였다. 다음은 본 연구의 주요 결론이다.

(1) 동일한 기상관측 자료를 이용하였음에도 진단모델의 격자 크기를 줄임에 따라 풍속의 변화 폭이 증가하는 현상을 관찰할 수 있었다. 이는 지형 효과가 반영된 측정치를 이용하는 것만큼 효과적이지는 않아도 모델 자체에서 어느 정도 지형 효과가 고려될 수 있음을 의미하는 것으로, 격자 크기를 줄인 바람장을 이용함으로써 단순 내삽 이상의 공간적 해상도를 높이는 효과를 기대할 수 있었다. 격자 크기를 1 km에서 100 m로 바람장의 공간적 해상도를 높였을 때 1시간 후 퍼프의 최고농도는 풍속변화가 심한 사례에서(평균 최고농도 기준) 최대 50%까지 변화였다.

(2) 1시간 동안 수 km 범위의 확산에서는 공간적 상세함 못지 않게 시간적으로 상세한 바람장을 이용하는 것이 중요하였다. 1시간 단위 관측치를 내삽하여 10분 단위 바람장을 구성하여 1시간 단위 바람장을 이용한 경우와 비교한 결과 누출물질의 이동 궤적과 최고 농도 모두 현저한 차이를 보여, 1시간 사이 풍속변화가 크게 증가한 사례에서는 최고농도가 1% 수준으로 감소하였고, 지형변화가 큰 사례에서는 2~3배 증가하였다. 그러나 풍향변화가 심한 사례에서는 바람장의 시간 변화보다 공간 변

화의 영향이 컸다.

물론 본 논문의 결론은 특별히 공간적, 시간적 변화가 큰 경우를 토대로 한 것이므로 통상의 경우보다 공간적, 시간적 해상도의 영향이 크게 나타난 것일 수 있다. 그러나 본 논문의 시간적 해상도는 관측치의 내삽에 의존하였고 공간적 해상도는 진단모델의 격자 크기를 이용한 만큼 김진영과 김영성(1999)이 지적한 바와 같이 현실의 다양한 변화가 충분히 반영된 것으로 보기 어려운 면도 있다. 해안선과 지형조건이 복잡한 우리나라와 같은 대기환경에서는 1시간 이하 혹은 2, 3시간 단위 좁은 영역에서의 이동, 확산을 예측하고자 할 때 바람장이 충분한 공간적, 시간적 해상도를 가질 수 있도록 유의할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 G-7 환경기술연구개발사업 중 유해화학물질 사고예측 기법 및 대응시스템 개발의 일환으로 수행되었습니다. 연구비를 지원하여 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

김영성, 윤도형, 장영수, 문길주 (1999) 여천지역 누출사고 시나리오에 따른 인근지역 피해 분석, 한국대기환경학회지, 15, 151-158.

김종수, 김영성, 오현선, 김진영, 김병욱 (1999) 유해화학물질 사고영향 예측프로그램 개발, 유해화학물질 사고예측 기법 및 대응시스템 개발, G-7 환경기술연구개발사업 환경위해성 평가 및 관리기술, 환경부.

김진영, 김영성 (1999) 상세한 기상관측 자료를 이용한 1997년 서울·수도권 고농도 오존 사례의 모델링, 한국대기환경학회지 (제출).

김진영, 김영성, 정관영 (2000) 서울·인천 지역 자동기상관측 바람 자료의 특성 분석, 한국기상학회지 (인쇄중).

오현선, 김영성 (2000) 여수지역 대기확산의 수치 모사 - II.

일사에 의한 일변화, 한국대기환경학회지, 16(3), 225-236.

정수희, 윤도영, 김영성 (1999) 주요 누출사고 예측 모델의 특성 비교, 한국대기환경학회지, 15, 687-696.

AICHe/CCPS (1996) *Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models*, 2nd Ed., Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York, NY.

Chang, Y.-S., D.F. Brown, and Y.S. Ghim (1997) Estimation of mixing heights using the Holzworth method in Korea, J. Korea Air Pollution Research Association, 13(E), 35-46.

Douglas, S.G., R.C. Kessler, and E.L. Carr (1990) *User's Guide for the Urban Airshed Model. Volume III: User's Manual for the Diagnostic Wind Model*, EPA-450/4-90-007C, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.

Kim, J.Y., Y.S. Ghim, Y.P. Kim, and D.D. Dabdub (2000) Determination of domain for diagnostic wind field estimation in Korea, Atmospheric Environment, 34, 595-601.

Kumar, N. and A.G. Russell (1996) Comparing prognostic and diagnostic meteorological fields and their impacts on photochemical air quality modeling, Atmospheric Environment, 12, 1989-2010.

McRae, G.J., A.G. Russell, and R.A. Harley (1992) *CIT Photochemical Airshed Model*, California Institute of Technology, Pasadena, CA.

Petersen, W.B. and L.G. Lavdas (1986) *INPUFF 2.0-A Multiple Source Gaussian Puff Dispersion Algorithm: User's Guide*, EPA-600/8-86-024, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.

USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1998) *PCRAMMET User's Guide*, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC [URL <http://www.epa.gov/scram001/>].

USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1992) *User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC2) Dispersion Models*, Volume 2, EPA-450/4-92-008b, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.