

Development of a Three-Dimensional Wind Field Model using the Principle of Variational Method

Kyung-Suk Suh · Eun-Han Kim · Won-Tae Whang and Moon-Hee Han

Korea Atomic Energy Research Institute

변분법 원리를 이용한 3차원 바람장 모델 개발

서경석 · 김은한 · 황원태 · 한문희

한국원자력연구소 원자력환경연구부

(2003년 1월 15일 접수, 2003년 4월 7일 채택)

Abstract - A three-dimensional wind field model based on the variational technique has been developed for estimating the overall wind patterns over a complex terrain. The three-dimensional elliptic partial differential equations on Cartesian and terrain-following coordinates have been established to obtain the Lagrangian multiplier and the adjusted wind velocity. The simulations were performed to evaluate the variations of the velocity vectors on the hemisphere, half-cylinder, and saddle type obstacles. Also, the wind field model in the terrain-following coordinate has been applied for evaluating the characteristics of wind patterns according to the variations of Gauss precision moduli on the hemispheric topography. The results showed that the horizontal and vertical wind components were strongly governed by the selection of the values of Gauss precision moduli.

Key words : wind field model, variational technique, complex terrain, Gauss precision moduli

요약 - 복잡한 지형상에서 바람장 분포를 산정하기 위해 변분기법에 근거한 3차원 바람장 모델을 개발하였다. Lagrangian multiplier와 조정된 바람장 분포를 얻기 위하여 직각 및 지형을 따르는 좌표계상에서 3차원 타원형 편미분 방정식이 수립되었다. 반구, 반 실린더 및 안장 형태의 지형상에서 바람장의 변화를 추정하기 위해 계산이 수행되었고, 또한 지형을 따르는 좌표계상에서 바람장 모델이 Gauss precision moduli의 변화에 따른 바람장 특성을 평가하기 위하여 적용되었다. 산정결과 수평 및 수직 바람 성분은 Gauss precision moduli값의 선정에 강하게 영향을 받고 있음이 확인되었다.

중심어 : 바람장 모델, 변분 기법, 복잡한 지형, Gauss precision moduli

서 론

원자력발전소와 같은 대규모 산업시설의 사고시 대기중으로 방출된 오염물의 이동·확산에 의한 주변 환경에 미치는 영향은 신속히 평가되어야 한다. 구 소련의 Chernobyl 원전 사고[1] 이후 원전 사고시 누출되는 기체상 방사성 물질로부터 주변 주민 및 환경을 보호하고 방사선 피해를 최

소화할 수 있는 비상대응 체계를 개발·개선하기 위한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다[2,3,4]. 이러한 관점에서 원자력시설의 사고시 신속한 비상 대응책 수립을 위하여 바람장 및 오염물의 농도장은 빠르게 계산되어야 한다.

대기중으로 방출된 오염물은 주로 바람에 의해 이동되므로 신뢰성 있는 바람장을 산정하는 것은 복잡한 지형상에서 오염물의 확산특성을 이해하

는데 중요한 요소이다. 바람장을 계산하는 방법에는 크게 두 가지로 나누어진다[5]. 하나는 prognostic 모델로 3차원의 동수역학 방정식을 적절한 수치기법에 의해 해석하는 것으로 많은 계산시간과 입력자료를 요구한다. 다른 하나는 diagnostic 모델로 일부 지점에서 관측된 바람자료를 이용하여 질량보존법칙을 만족하는 바람장을 계산하는 것으로 계산시간이 빠른 장점을 갖고 있다.

본 연구에서는 일부 지점에서 관측된 바람자료를 이용하여 변분법 원리[6]에 입각한 질량 보존식을 만족하는 3차원 바람장 모델을 개발하였다. 개발된 바람장 모델은 간단한 형태의 지형에 대해 직각 좌표계(Cartesian coordinate)와 지형을 따르는 좌표계(terrain-following coordinate)상에서 각각 바람분포를 계산하여 상호 비교하였다. 또한 반구형태의 지형상에서 수평·수직방향의 유속 형태를 결정하는 Gauss precision moduli[3]의 변화에 따른 바람장 분포의 변화를 고찰하는데 적용되었다.

바람장 모델

대부분의 질량보존의 diagnostic 바람장 모델의 수직 좌표계 시스템은 직각좌표계와 지형을 따르는 좌표계로 분류할 수 있다. 직각 좌표계를 사용할 경우 복잡한 지형을 계단 형태로 반영함으로써 지표면 부근에서는 수직격자를 좀더 세분화하여 계산시간이 많이 걸리고, 지표면의 바닥 경계를 적절히 처리하지 못하여 이 부근에서 유속분포의 오차를 유발하기도 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 지형을 따르는 좌표계를 이용할 경우 바닥 경계조건을 좀더 정확하게 처리할 수 있으며 수직 좌표계를 가변 격자망으로 구성할 수 있는 장점이 있다[7,8,9].

본 연구에서는 직각 좌표계 사용시 발생하는 이러한 오류를 최소화하고 지표면부근에서의 바람장을 좀더 정확히 재현하기 위하여 지형을 고려한 좌표계를 이용하여 변분법 원리에 입각한 3차원 바람장 모델을 개발하였다. 또한 지형 좌표계를 사용한 모델의 결과와 동일 조건에서의 비교를 위하여 직각 좌표계를 이용한 경우의 3차원 바람장 모델을 개발하였다. 개발된 바람장 모델은 일부지점에서 관측된 바람장을 수평 및 수직방향으로 내·외삽을 통하여 초기 바람장을 발생시키고, 최종적으로 질량보존 방정식을 만족하는 함수

가 최소값을 갖도록 하는 변분법 원리[6,10]에 의하여 바람장을 구하도록 하였다.

직각 좌표계(Cartesian coordinate)

Lagrange multiplier이론을 이용하여 연속방정식은 변분원리(variational techniques)[6,10]에 의해 적분함수를 최소화하도록 구성되어져 있는데 수학적으로 최소화 함수는 다음과 같다.

$$E(u, v, w, \lambda) = \iiint [a_1^2(u - u^0)^2 + a_2^2(v - v^0)^2 + a_3^2(w - w^0)^2 + \lambda(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z})] dV \quad (1)$$

윗 식에서 α_1 및 α_2 는 Gauss precision moduli로 수평 및 수직성분의 상대적 크기를 규정하는 변수이고, u^0, v^0, w^0 는 초기 바람장 성분이고, u, v, w 는 최종 보정된 바람장 성분, λ 는 Lagrange multiplier이다. 식 (1)의 함수 E를 최소화하면 다음과 같은 Euler-Lagrange 방정식 및 연속 방정식을 얻을 수 있다[11].

$$u = u^0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x}, v = v^0 + \frac{1}{2\alpha_2^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y}, w = w^0 + \frac{1}{2\alpha_3^2} \frac{\partial \lambda}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

식(2)를 식(3)에 대입하면 λ 에 대한 다음과 같은 Poisson방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + (\frac{\alpha_1}{\alpha_2})^2 \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} = -2\alpha_1^2 (\frac{\partial u^0}{\partial x} + \frac{\partial v^0}{\partial y} + \frac{\partial w^0}{\partial z}) \quad (4)$$

식(4)를 풀기 위한 경계조건으로 양 측면 경계는 개방경계로 흐름이 통과하는 경계조건으로 상층 및 지표면은 경계의 수직인 면으로 흐름이 통과하지 않는 폐쇄 경계조건을 다음과 같이 주었다.

- 측면 경계조건 : $\lambda = 0$

- 상층 및 지표면 경계조건 : $\frac{\partial \lambda}{\partial n} = 0$ (5)

식 (4)의 편미분 방정식을 유한 차분법(Finite Difference Method)으로 전개한 후 식 (5)의 경계조건을 이용하여 구성된 연립 방정식을 SOR(Successive Over Relaxation)방법으로[12] 풀어 λ 를 구한 후 최종적으로 식 (2)에 대입하여 보정된 바람장을 계산한다.

지형을 따르는 좌표계 (terrain-following coordinate)

직각 좌표계를 이용할 경우 유발할 수 있는 지표면 부근에서의 바람장 분포의 오차를 최소화하고 바람장을 좀더 정확하게 산정하기 위하여 지형을 따르는 좌표계(terrain-following coordinate or sigma coordinate)에 대한 바람장 수치 모델을 개발하였다. 직각 좌표계 시스템과 마찬가지로 Lagrange multiplier 이론을 이용하여 연속방정식은 변분원리[10]에 의해 적분함수를 최소화하도록 구성되어져 있는데 수학적으로 최소화 함수는 다음과 같다.

$$E(u, v, \tilde{w}, \lambda) = \iiint [a_1^2(u - u^0)^2 + a_1^2(v - v^0)^2 + a_2^2(\pi\tilde{w} - \pi\tilde{w}^0)^2 + \lambda(\frac{\partial\pi u}{\partial x} + \frac{\partial\pi v}{\partial y} + \frac{\partial\pi\tilde{w}}{\partial z})] dV \quad (6)$$

$$\alpha(x, y) = \frac{H - z}{H - h(x, y)} = \frac{H - z}{\pi} \quad (7)$$

윗 식에서 α_1 및 α_2 는 Gauss precision moduli로 수평 및 수직성분의 상대적 크기를 규정하는 변수이고, 지형을 따르는 좌표계의 $\sigma=1$ 은 지표면을 $\sigma=0$ 는 계산영역의 최상층을 의미한다(Fig. 1). $h(x, y)$ 는 지형의 높이, H 는 계산영역의 최상층 수직높이, u^0, v^0, \tilde{w}^0 는 초기 바람장 성분이고, u, v, \tilde{w} 는 최종 보정된 바람장 성분, λ 는 Lagrange multiplier이다. 식 (6)의 함수 E를 최소화하면 다음과 같은 Euler-Lagrange 방정식 및 연속 방정식을 얻을 수 있다[7,8].

$$u = u^0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \left[\frac{\partial\lambda}{\partial x} + \frac{\sigma}{\pi} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial\lambda}{\partial\sigma} \right]$$

$$v = v^0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \left[\frac{\partial\lambda}{\partial y} + \frac{\sigma}{\pi} \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial\lambda}{\partial\sigma} \right] \quad (8)$$

$$\tilde{w} = \tilde{w}^0 - \frac{1}{2\alpha_2^2} \left[\frac{1}{\pi} \frac{\partial\lambda}{\partial\sigma} \right]$$

$$\frac{\partial(\pi u)}{\partial x} + \frac{\partial(\pi v)}{\partial y} + \frac{\partial(\pi\tilde{w})}{\partial\sigma} = 0 \quad (9)$$

식(8)을 식(9)에 대입하면 λ 에 대한 다음과 같은 Poisson방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\pi \frac{\partial\lambda}{\partial x} + \sigma h \frac{\partial\lambda}{\partial\sigma} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\pi \frac{\partial\lambda}{\partial y} + \sigma h \frac{\partial\lambda}{\partial\sigma} \right] + \frac{\partial}{\partial\sigma} \left[\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^2 + \sigma^2 (h_x^2 + h_y^2) \right] \frac{1}{\pi} \frac{\partial\lambda}{\partial\sigma} + \sigma \left[h_x \frac{\partial\lambda}{\partial x} + h_y \frac{\partial\lambda}{\partial y} \right] = -2\alpha_1^2 \left[\frac{\partial(\pi u^0)}{\partial x} + \frac{\partial(\pi v^0)}{\partial y} + \frac{\partial(\pi\tilde{w}^0)}{\partial\sigma} \right] \quad (10)$$

식(10)을 풀기 위한 경계조건으로 양 측면 경계는 개방경계로 흐름이 통과하는 경계조건으로 상층

및 지표면은 경계의 수직인 면으로 흐름이 통과하지 않는 폐쇄 경계조건을 다음과 같이 주었다.

- 측면 경계조건 : $\lambda=0$
- 상층 경계조건 : $\frac{\partial\lambda}{\partial\sigma} = 2\alpha_2^2\pi u^0$ (11)
- 지표면 경계조건 : $\frac{\partial\lambda}{\partial\sigma} = -\pi \frac{2\alpha_1^2\pi\tilde{w}^0 + h_x \frac{\partial\lambda}{\partial x} + h_y \frac{\partial\lambda}{\partial y}}{(\frac{\alpha_1}{\alpha_2})^2 + h_x^2 + h_y^2}$

식 (10)의 편미분 방정식은 직각 좌표계의 해석과 같이 유한 차분법(Finite Difference Method)으로 전개한 후 식 (11)의 경계조건을 이용하여 구성된 연립 방정식을 SOR(Successive Over Relaxation) 방법으로[12] 풀어 λ 를 구한 후 최종적으로 식 (8)에 대입하여 지형을 따르는 좌표계상에서 보정된 바람장을 계산한다.

시험계산에 고려된 지형

개발된 3차원 바람장 모델의 지형효과 및 Gauss precision moduli의 변화에 대한 반응을 살펴보기 위해 간단한 반구(hemisphere), 반 실린더(half-cylinder) 및 안장 형태(saddle-type)의 세 개의 지형을 고려하여 수치계산을 수행하였다. 고려된 세 개의 지형 형태를 Fig. 2, Fig. 3 및 Fig. 4에 나타내었다. 계산영역은 수평방향으로 2 km x 2 km, 수직방향으로 900 m를 고려하였고, 수평 격자간격은 $\Delta x = \Delta y = 50$ m로 그리고 수직 격자는 $\Delta z = 100$ m로 40 x 40 x 9개의 격자망을 형성하였다.

Fig. 2의 반구는 영역의 중심부로부터 반지름 500 m까지 높이가 점진적으로 감소하는 반구형태이다. Fig. 3의 반 실린더는 영역의 중심부로부터 x 방향으로 반지름 500 m까지 높이가 점진적으로 감소하고, y 방향으로 무한히 긴 반 실린더 형태를 취하였다. Fig. 4의 지형은 y방향으로 양단의 최대 높이에서 중심을 향해 높이가 점진적으로 감소하는 안장의 지형을 고려하였다. 이러한 지형상에서 개발된 3차원 바람장 모델의 유속 분포가 지형의 전면부와 후면부에서 지형 효과에 의해 변화하는 현상을 고찰하고, 특히 오염물 이동모델에서 중요한 지표면 부근에서 바람의 변화 형태를 파악하는데 이용되었다.

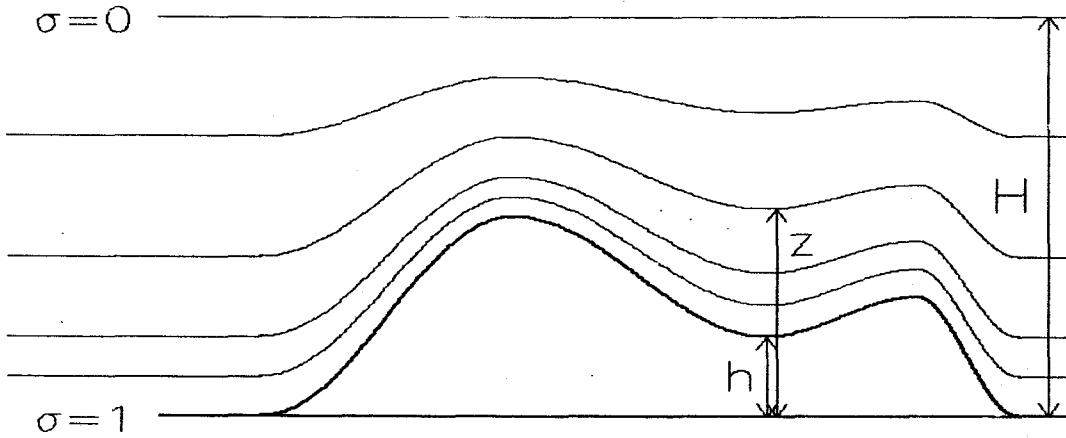


Fig. 1. The system of terrain-following vertical coordinate.

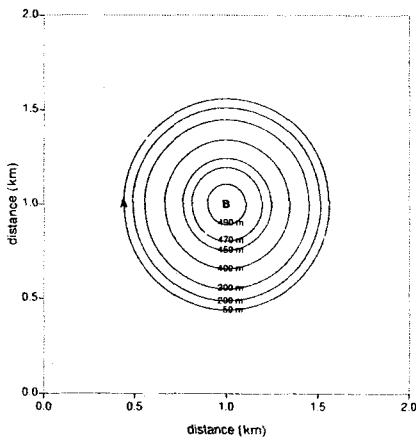


Fig. 2. The contour lines of hemispheric topography.

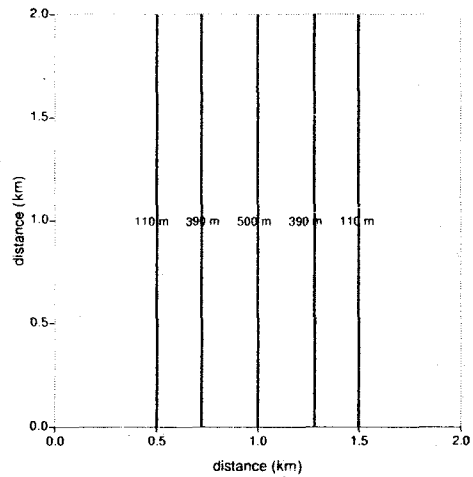


Fig. 3. The contour lines of half-cylinder topography.

계산 결과

새 개 형태의 지형상에서 초기 바람장은 x 방향의 u 성분을 전 영역에 걸쳐 일정하게 1 m/s로 주었다. 각각 다른 수직 좌표계상에서 바람장의 수평·수직분포의 차이점을 살펴보기 위해 동일 조건에서 직각 좌표계와 지형을 따르는 좌표계상에서 바람장을 계산하여 비교하였다. 또한, 수평 및 수직성분의 상대적 크기를 규정하는 α ($=\alpha_1/\alpha_2$)는 전 영역에 걸쳐 대기 안정도가 중립인 1의

값을 주었다[5]. 반구, 반 실린더 및 안장 형태에 대한 계산 결과를 Fig. 5에서 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 5에서 Fig. 10의 그림 중 (a)는 지표면 부근에서 수평 바람장 분포(u, v 성분)이고, (b)는 y축의 중심에서 x축 방향을 따르는 수직 바람장 분포(u, w)이다.

반구 형태의 지형상에서 직각 및 지형을 따른 좌표계를 이용하여 계산된 바람장 분포인 Fig. 5와 Fig. 6을 비교해 보면, 직각 좌표계에서 지표면의 수평 바람장 성분은 반구 형태가 지형 장애

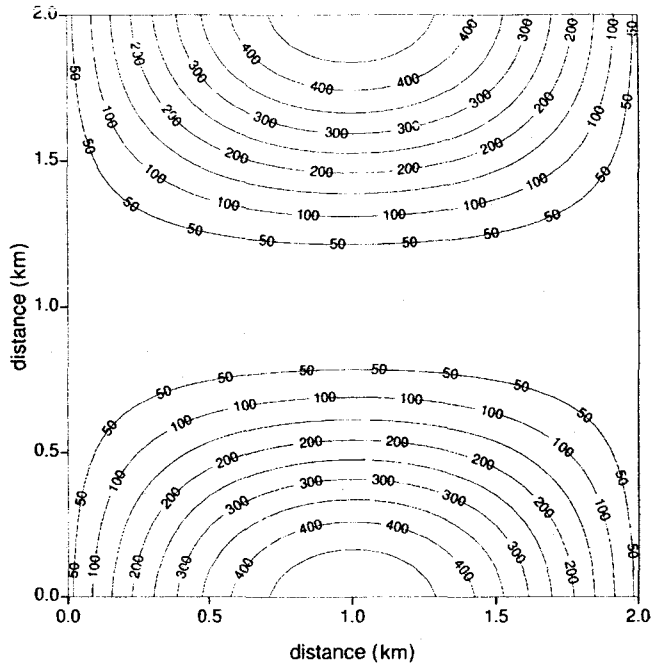
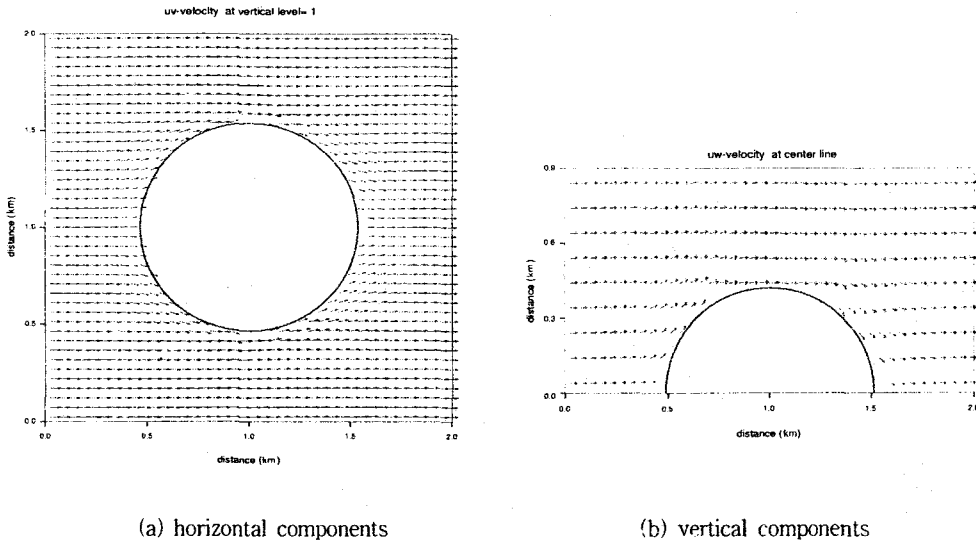


Fig. 4. The contour lines of saddle-type topography.



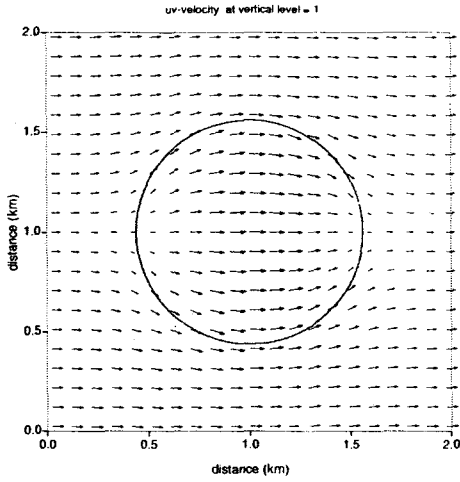
(a) horizontal components

(b) vertical components

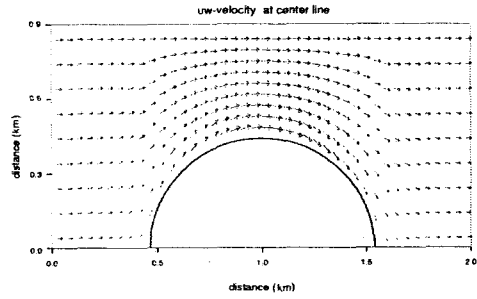
Fig. 5. Calculated wind vectors for hemisphere in Cartesian coordinate.

물로 취급되어 이 부근에서는 바람장 성분이 계산되지 않는다. 이는 중심선에서 바람의 수직성분을 비교해 보면 직각 좌표계의 경우 반구의 정점

위로 5개의 바람장을 계산하는데 반해 지형을 따르는 좌표계에서는 지형 장애물이 없는 부근과 마찬가지로 9개의 바람장을 계산하고 있어 지표

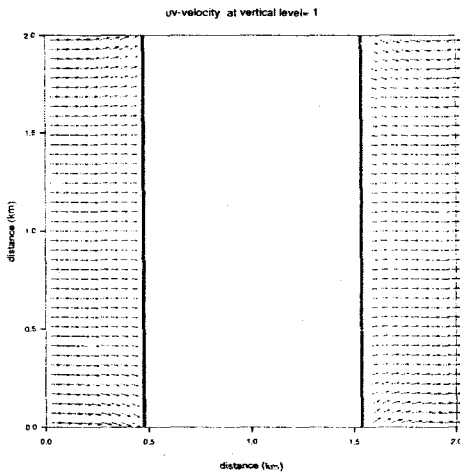


(a) horizontal components

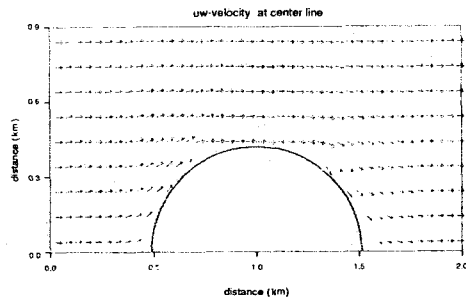


(b) vertical components

Fig. 6. Calculated wind vectors for hemisphere in sigma coordinate.



(a) horizontal components



(b) vertical components

Fig. 7. Calculated wind vectors for half-cylinder in Cartesian coordinate.

면 부근에서 지형 장애물에 의한 영향을 좀더 잘 재현하고 있다. Fig. 6의 수평 바람장 분포를 살펴보면 반구의 전면부에서 지형 장애물을 만나 유속이 작아지다가 반구의 중심부를 통과하면서 유속이 증가하고 있으며 대칭형의 반구이기에 후면부에서는 전면부와 유사히 유속이 감소하는

것이 잘 재현되고 있다. 또한 측면부에서는 지형 효과에 의해 유속이 양옆으로 휘어 흘러나갔다가 다시 지형을 타고 흘러 들어오는 현상이 잘 나타나고 있다.

반 실린더 형태의 Fig. 7과 Fig. 8도 직각 및 지형을 따르는 좌표계의 계산결과는 반구 형태와

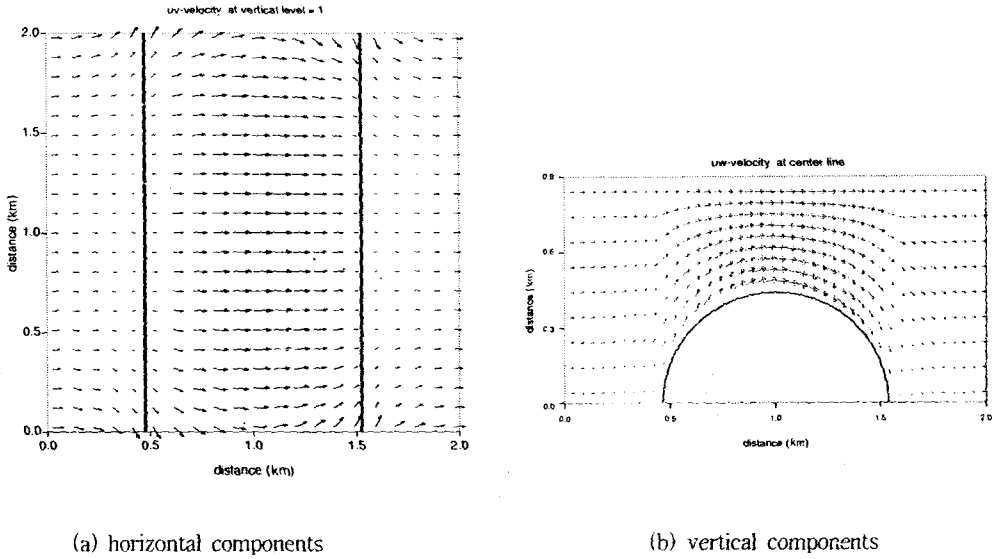


Fig. 8. Calculated wind vectors for half-cylinder in sigma coordinate.

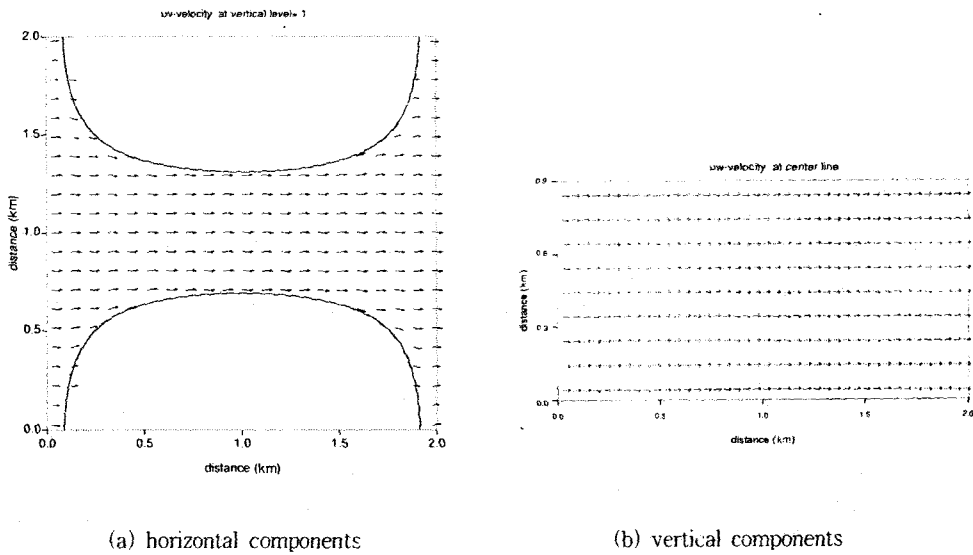
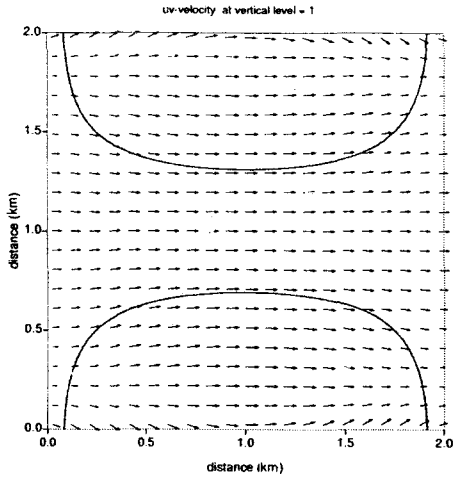


Fig. 9. Calculated wind vectors for saddle-type in Cartesian coordinate.

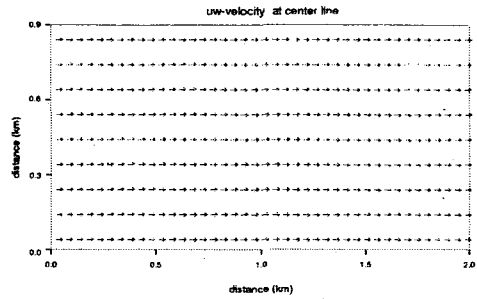
유사한 산정 결과를 나타내고 있다. Fig. 8의 수평 바람장은 양측면부에서 바람이 밖으로 휘어나갔다가 다시 흘러 들어오는 것이 나타나고 있는데, 이는 바람장 모델의 측면 경계조건을 흐름이 통과하는 조건으로 주었기에 나타나는 결과가

다. 또한 반구 형태의 산정결과와 마찬가지로 높이가 점점 높아지는 부근을 통과하면서 유속이 강하게 산정되는 것이 잘 재현되고 있다.

Fig. 9와 Fig. 10에서와 같이 안장 형태의 경우 적각 좌표계상에서 지형은 장애물로 작용하여

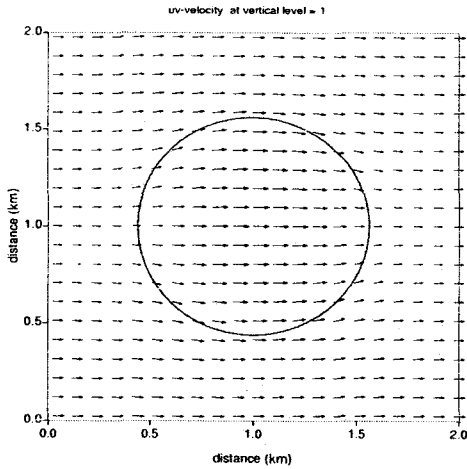


(a) horizontal components

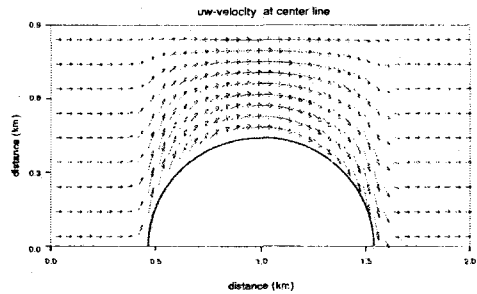


(b) vertical components

Fig. 10. Calculated wind vectors for saddle-type in sigma coordinate.



(a) horizontal components



(b) vertical components

Fig. 11. Calculated wind vectors for $\alpha=10$ in sigma coordinate.

이 부근의 수평 바람장이 산정되지 않고 있다. Fig. 10의 수평 바람장은 지형을 타고 넘으면서 유속이 좀더 크게 산정되고, 지형 장애물이 없는 중심 부근에서는 일정한 유속으로 통과하고 있는 것이 나타나고 있다. 중심선에서의 수직분포는 장

애물이 없기에 직각 및 지형을 따르는 좌표계에서 유사한 형태를 나타내고 있다.

3차원 바람장 모델에서 Gauss precision moduli ($a = \alpha_1/\alpha_2$)는 수평 및 수직성분의 상대적 크기를 규정하는 변수로 $a \gg 1$ 경우 수직방향의 흐

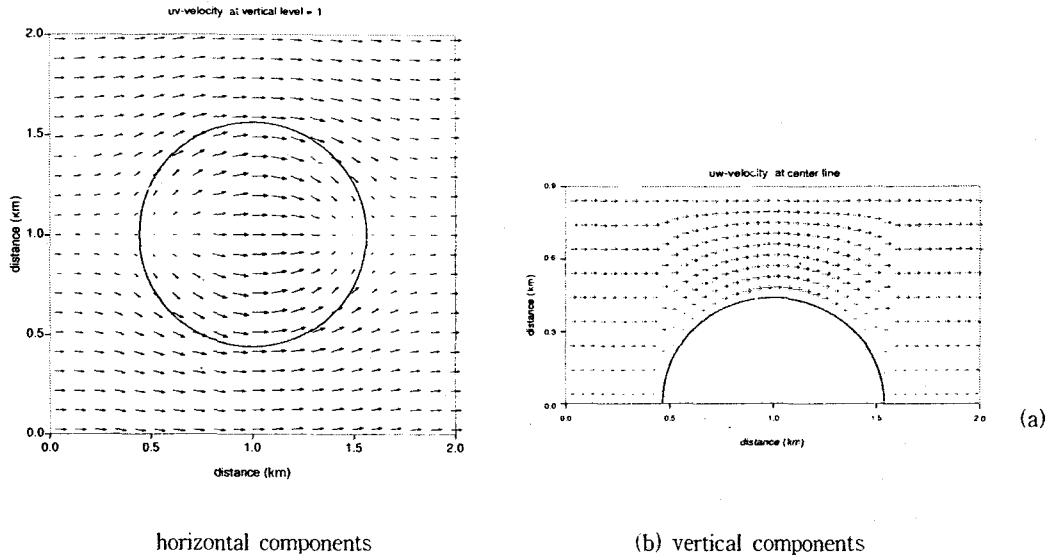


Fig. 12. Calculated wind vectors for $\alpha=0.1$ in sigma coordinate.

를 성분이 크기 때문에 지형을 타고 넘는 흐름 성분이 강하고, $\alpha < 1$ 경우 수평성분의 흐름이 강하여 지형의 옆으로 흐르는 성분이 크다. 따라서 $\alpha > 1$ 경우 대기 안정도는 불안정, $\alpha = 1$ 는 중립, $\alpha < 1$ 경우는 안정된 경우로 정의할 수 있다[13].

본 연구에서는 대기 안정도가 중립인 조건으로 $\alpha = 1$ 로, 불안정 조건으로 $\alpha = 10$ 으로, 안정 조건으로 $\alpha = 0.1$ 로 주어 반구 형태의 지형상에서 α 값의 변화에 따른 바람장의 분포를 산정하였다. Fig. 6($\alpha = 1$), Fig. 11($\alpha = 10$), Fig. 12($\alpha = 0.1$)를 비교하여 보면 α 값이 큰 경우가 α 값이 적은 경우에 비해 지형의 전면부에서 바람의 수직 성분이 강해 지형을 타고 넘는 흐름이 강하게 나타나고 있다. α 값이 적은 Fig. 12에서는 수직성분보다는 수평방향의 흐름이 강하여 바람이 지형의 양옆을 타고 흐르는 흐름이 강하게 나타나고 있다. Fig. 13에 반구의 전면부 A지점(Fig. 2참고)과 Fig. 14에 반구의 중심부 B지점(Fig. 2참고)에서 α 값의 변화에 따른 유속의 수직 분포를 나타내었다. Fig. 13의 A지점의 수평 유속분포를 살펴보면 $\alpha = 10$ 인 경우에 지표면에서 그 값이 가장 크게 산정되는데, 이는 반구의 전면부에서 수직 성분이 커 흐름이 반구를 타고 넘고, 수평유속은 지표면에서 상층부까지 일정한 값을 유지하기 때문이다. $\alpha = 0.1$ 인 경우 전면부의 지표면 부근에서는 흐름이 옆으로 대부분 흐르기 때문에 값이 적게

산정되었고, 상층부로 가면서 지형의 영향을 받지 않고 질량보존을 만족하기 위해 값이 커지고 있음이 잘 나타나고 있다. Fig. 14의 B지점의 수평 유속분포를 살펴보면 반구의 중심부에서는 전반적으로 지표면에서 상층부까지 일정한 유속 분포를 보이고 있다. 또한, $\alpha = 10$ 인 경우 바람의 많은 부분이 지형을 타고 넘어와 그 값이 크게 산정되고, $\alpha = 0.1$ 인 경우 바람이 지형의 양 옆으로 흘러 반구의 중심부에서 그 값이 적게 산정되고 있음을 알 수 있다. 중심부에서는 z방향의 수직 성분 $w = 0$ 로 일정한 값을 갖으므로 제시하지 않았다.

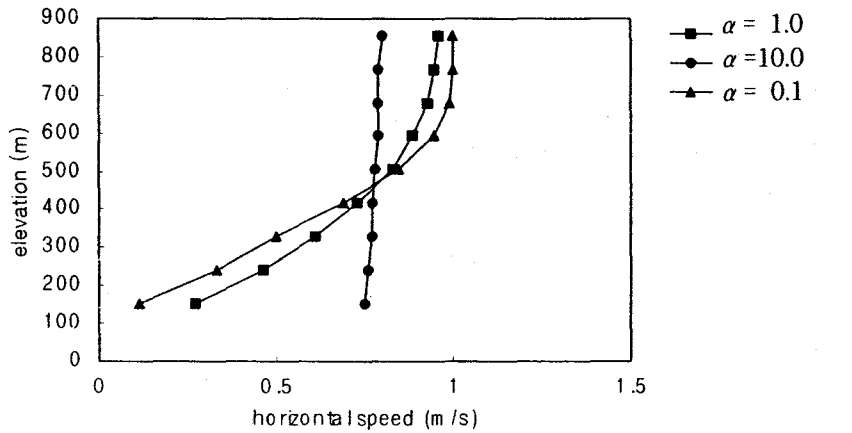
계산 결과 바람장 모델은 Gauss precision moduli (α)값의 변화에 대해 지형물 전반부에 수평 및 수직방향의 상대적 흐름이 잘 제시되었다. 이는 α 값이 지형의 전면부에서 바람장의 형태를 결정하여, 전반적인 바람장 형태를 나타내는 중요한 요소임을 알 수 있다.

결 론

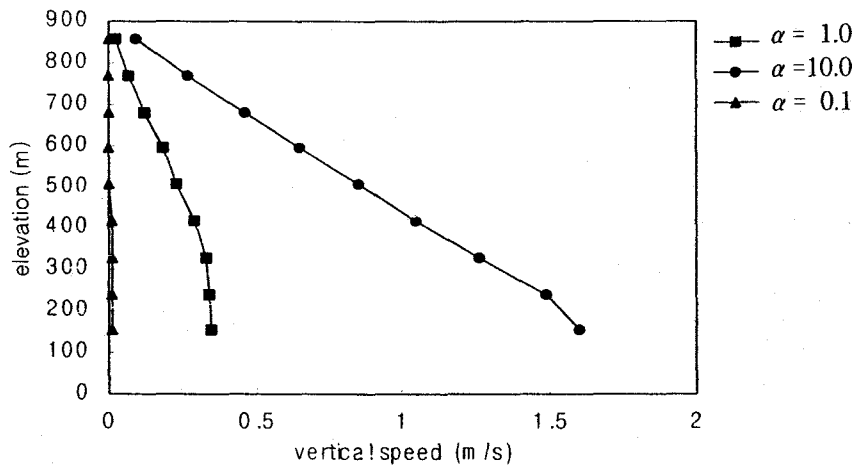
변분법 원리에 입각한 3차원 바람장 모델이 원자력발전소와 같은 대규모 산업시설의 사고시 신속한 바람장 계산을 위하여 개발되었다. 개발된 바람장 모델은 직각 좌표계 및 지형효과를 고려

한 좌표계상에서 3차원 바람장 분포를 계산할 수 있도록 설계되었다. 모델은 세 개 형태의 각기 다른 지형상에서 지형효과에 의한 바람의 분포 형태를 잘 재현하였고, 또한 Gauss precision moduli의 변화에 대해 수평 및 수직방향의 유속 형태가 잘 반응하였다. 특히 지형을 따르는 좌표계상의 바람장 모델은 지표면부근에서 좀더 정확

한 바람장을 산정할 것으로 생각된다. 개발된 바람장 모델은 최종적으로 실시간 방사선 피폭해석 시스템인 FADAS(Following Accident Dose Assessment System)[14]의 부모들로 제공되어 방사선 재해시 주변 환경에 미치는 방사선적 영향을 평가하는데 이용될 것이다.



(a) horizontal components



(b) vertical components

Fig. 13. Calculated wind profiles on the point A in sigma coordinate.

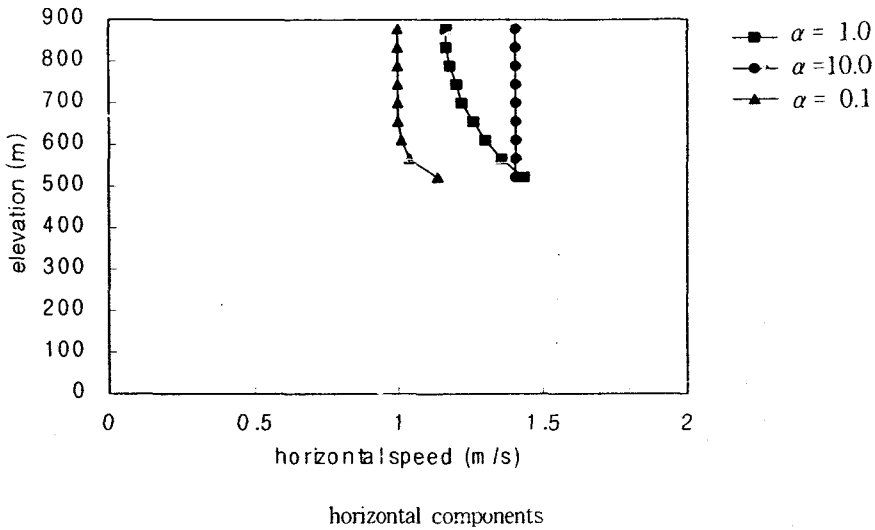


Fig. 14. Calculated wind profiles on the point B in sigma coordinate.

사 사

본 연구는 과학기술부에서 지원한 원자력중장기과제 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Sandalls, F. J., Segal, M. G. and Victorova, N., "Hot particles from Chernobyl: a review," *J. of Environmental Radioactivity*, 18, 5-22 (1993).
2. Dickerson, M. H., and Orphan, R. C., "Atmospheric release advisory capability," *Nuclear Safety*, 17, 281-289(1976).
3. Chino, M. and Ishikawa, H., "Experimental verification study for system for prediction of environmental emergency dose information; SPEEDI, (I)," *J. of Nuclear Science and Technology*, 25(9), 721-730 (1988).
4. Ehrhardt, J., Sauer, J., Schule, O., Benz, G., Rafat, M. and Richter, J., "Development of RODOS, a comprehensive decision support system for nuclear emergencies in Europe-an

- overview," *Radiation Protection Dosimetry*, 50, 195-203(1993).
5. Ratto, C. F., Festa, R., Romeo, C., Frumento, O. A., and Galluzzi, M., "Mass-consistent models for wind fields over complex terrain : the state of the art," *Environmental Software*, 9 247-268(1994).
6. Sasaki, Y., "Some basic formalisms in numerical variational analysis." *Mon. Wea. Rev.*, 98, 875-883(1970).
7. Barnard, J. C., Wegley, H. L., and Hiester, T. R., "Improving the performance of mass consistent numerical models using optimization techniques," *J. Climate Appl. Meteor.*, 26, 675-686(1987).
8. Moussiopoulos, M., and Flassak, TH., "Two vectorized algorithms for the effective calculation of mass-consistent flow fields," *J. Climate Appl. Meteor.*, 25, 847-857(1985).
9. Ross, D. G., Smith, I. N., Manins, P. C., and Fox, D. G., "Diagnostic wind fields modeling for complex terrain : model development and testing," *J. Applied Meteor.*, 27, 785-796(1988).
10. Sherman, C. A., "A mass-consistent model for

- wind fields over complex terrain," *J. Applied Meteor.*, 17, 312-319(1977).
11. Dickerson, M. H., "MASCON-A mass consistent atmospheric flux model for regions with complex terrain." *J. Applied Meteor.*, 17, 241-253(1978).
 12. Hoffman, K. A., *Computational Fluid Dynamics for Engineers*, Engineering Education System, Austin, 1-567(1989).
 13. Ross, D. G., and Fox, D. G., "Evaluation of an air pollution analysis system for complex terrain," *J. Applied Meteor.*, 30, 909-923 (1991).
 14. 한문희, 이영복, 김은한, 서경석, 황원태, 실시간 방사선 피폭해석 시스템 구성 연구, KAERI/RR-1737/96, 한국원자력연구소(1997).