

1D2) 복잡지형 확산모델을 위한 비선형 난류응력 분리

Decomposition of Nonlinear Reynolds Stress for Dispersion Model in Complex Terrain

김현구

한국에너지기술연구원

1. 서론

복잡지형에서의 대기오염물질 확산거동은 매우 복잡한 양상을 나타내므로 확산영향평가를 위해서는 우선적으로 정확한 대기유동장의 해석이 요구된다. 현재 복잡지형에서의 바람장을 해석하는 가장 정확한 방법은 전산유동해석(Computational Fluid Dynamics; CFD)일 것이다. 그러나 대부분의 CFD 모델에서 채택하고 있는 난류모델은 등방성(isotropic) 난류응력(또는 레이놀즈 응력; Reynolds stress)을 가정하고 있기 때문에 실제 대기유동의 비선형(nonlinear) 비등방성(anisotropic) 난류응력에 의한 비등방성 확산현상의 정확한 모사에는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 선형 난류모델을 사용하여 기 획득된 유동장으로부터 비선형 난류응력식에 의해 비등방성 난류응력을 분리(decomposition)함으로써 비등방성 확산예측을 위한 난류확산계수의 산정에 필요한 난류응력을 재생성하는 방법을 소개하고자 한다.

2. 연구 방법

대기유동을 점성 비압축성 난류유동으로 가정하면 그 지배방정식은 레이놀즈-평균 나비에-스톡스(Reynolds-Averaged Navier-Stokes; RANS) 방정식이다.

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0, \quad \frac{\partial (U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right\} - 2\epsilon_{ijk} w_j U_k \quad (1)$$

여기서 U_i 와 u_i 는 각각 x_i 좌표방향으로의 평균(mean) 및 변동(fluctuation) 유속이며 ρ 와 ν 는 공기의 밀도와 점도, p 압력, w_j 지구의 자전 각속도 벡터이다.

위 식이 해석 가능하기 위해서는 우변의 난류응력 $-\overline{u_i u_j}$ 가 정의되어야 하므로 난류모델이 도입되어야 한다. 선형 등방성(linear isotropic) 가정에 의해 정의되는 난류응력은,

$$-\overline{u_i u_j} = 2\nu_t S_{ij} - \frac{2}{3}k\delta_{ij} \quad (2)$$

여기서 $\nu_t = C_\mu k^2/\epsilon$ 는 난류와점도(turbulent eddy viscosity)이다. 한편 난류응력은 평균변형률 텐서(mean strain-rate tensor) $S_{ij} = (\partial U_i/\partial x_j + \partial U_j/\partial x_i)/2$ 의 1차 선형함수로 표현되며 유속의 평균변형이 없을 경우 레이놀즈 수직응력(normal stress)은 등방성이다.

다음은 본 연구에서 난류응력 분리를 위해 사용한 Craft et al. (1993)의 비선형 난류응력모델(Non-Linear Eddy Viscosity Model; NLEVM)로 난류응력이 평균변형률 텐서 및 평균와도텐서(mean vorticity tensor) $\Omega_{ij} = (\partial U_i/\partial x_j - \partial U_j/\partial x_i)/2$ 의 3차식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} -\overline{u_i u_j} = & 2\nu_t S_{ij} - \frac{2}{3}k\delta_{ij} + C_I \nu_t \frac{k}{\epsilon} (S_{ik} S_{kj} - \frac{1}{3} S_{kl} S_{kl} \delta_{ij}) \\ & + C_{II} \nu_t \frac{k}{\epsilon} (\Omega_{ik} S_{kj} + \Omega_{jk} S_{ki}) \\ & + C_{III} \nu_t \frac{k}{\epsilon} (\Omega_{ik} \Omega_{jk} - \frac{1}{3} \Omega_{kl} \Omega_{kl} \delta_{ij}) \\ & + C_{IV} C_\mu \nu_t \frac{k^2}{\epsilon^2} (S_{ki} \Omega_{ij} + S_{kj} \Omega_{li} - \frac{2}{3} S_{km} \Omega_{lm} \delta_{ij}) S_{kl} \\ & + C_{VI} C_\mu \nu_t \frac{k^2}{\epsilon^2} S_{ij} S + C_{VII} C_\mu \nu_t \frac{k^2}{\epsilon^2} S_{ij} \Omega_{kl} \Omega_{kl} \end{aligned} \quad (3)$$

위 식에서 $C_I \sim C_{VII}$ 은 비선형 난류상수로, C_I, C_{II}, C_{III} 항들은 수직응력의 비등방성에 관한 2차

(quadratic) 항들이며 C_{IV}, C_{IV}, C_{VII} 항들은 유선곡률과 유동회전에 영향을 받는 3차(cubic) 항들이다.

3. 결과 및 고찰

복잡지형에서 난류응력의 변형을 고찰하기 위하여 저자의 선행연구(Kim et al., 2000)인 아스커베인 언덕(Askervein Hill)의 전산유동해석 결과를 이용하여 선형 및 비선형 난류응력항을 분리하여 비교하였다. 그림 1은 아스커베인 언덕 지면 10m 높이에서의 선형 및 비선형 수직응력을 각각 선형 난류응력식 (2)와 비선형 난류응력식 (3)으로 분리한 결과이다. 그래프에서 실선으로 표시된 선형 난류응력의 경우 상류쪽(그림의 좌측) 평지에서 모두 동일한 값을 가지는데, 이는 선형 난류응력식 (2)가 선형 등방성 특성을 가지기 때문이다. 반면에 도형으로 표시된 비선형 난류응력의 분포는 동일 지점에서 각 난류응력 간에 분명한 비율(ratio)이 존재하며 이는 실제 대기유동장의 특성과 동일한 현상이다. 따라서 이러한 점만을 고려할 때에도 선형 난류모델은 실제 대기유동장의 가장 기본적인 특성을 모사하지 못하는 반면 비선형 난류모델은 난류응력의 비등방성을 정확하게 모사함을 지적할 수 있다.

참고로 선형 난류모델이라고 하더라도 지형의 영향에 의하여 평균유속의 구배가 발생하면 이로 인한 난류응력의 변형이 수반되며 그림에서 언덕을 지나는 부분에서 바로 그러한 지형의 영향으로 각 수직응력 간의 비등방성이 나타나게 된다. 특히 상류언덕의 후면(500m 지점)에서는 3차원 유동의 영향으로 국부적인 유동박리가 수반되며 이로 인하여 난류응력이 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 특이점으로 언덕의 정상부에서 수평방향 난류응력은 국부적으로 감소하지만 수직방향 난류응력은 증가하여 일반적인 대기유동의 비율이 역전되는 현상이 나타난다. 따라서 이러한 비등방성 난류응력에 의해 대기확산의 특성이 크게 변화할 것이란 점이 분명하며, 따라서 본 연구의 해석법이 보다 정확한 복잡지형에서의 대기확산예측을 위한 유용한 해석법을 제공한다고 결론내릴 수 있다.

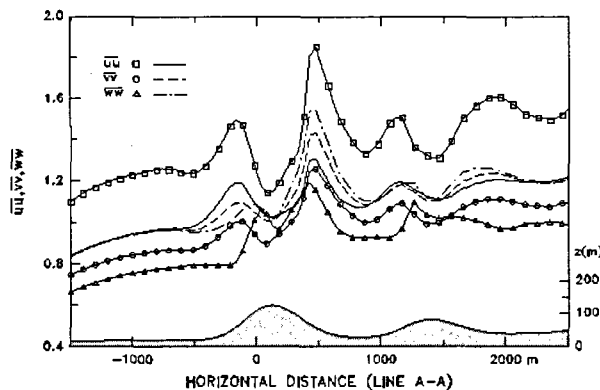


Fig. 1. Distributions of normal Reynolds stresses in wind flow over Askervein Hill (10m a.g.l.) lines w/o symbol: linear Reynolds stresses decomposed by Eq. (2) lines w/ symbols: non-linear Reynolds stresses decomposed by Eq. (3).

참 고 문 헌

- Kim, H.G., Patel, V.C., Lee, C.M. (2000) Numerical Simulation of Wind Flow over Hilly Terrain, *J. Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 87, 45-60.
- Craft, T.J., Launder, B.E., Suga, K. (1997) Prediction of turbulent transitional phenomena with a nonlinear eddy-viscosity model, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 18, 15-28.