

風荷重이 農業施設物의 構造的 安定性에 미치는 影響

- 數値 해석에 의한 風力係數分布 算定 -

崔弘林 · 孫禎翼* · 李錫健**

서울大學校 動物資源學科, *農工學科, **慶北大學校 農工學科

The Effect of Wind Force on Stability of Agricultural Structures

- Numerical Calculation of Wind Pressure Coefficients -

Choi, Hong-Lim · Son, Jung-Eek · Lee, Suk-Gun*

Dept. of Animal Sci., *Dept. of Agr.Eng., Seoul Nat'l Univ.

**Dept. of Agr.Eng., KyungPook Nat'l Univ.

1. 研究目的

일반적으로 풍력계수의 산정방법은 風洞實驗에 의한 실측방법과 수치해석에 의한 예측방법 등이 있다. 風洞實驗은 보다 정확하고 다양한 실험자료를 얻을 수 있는 반면, 風洞을 설치하기 위한 초기시설비가 너무 높고, 농업시설과 같이 다양한 형태를 위해서 장치를 변형할 경우 변형비용과 시간이 너무 많이 드는 단점이 있다. 수치해석은 풍동에 의한 분석의 단점인 변형비용과 시간은 경계조건의 변형과 빠른 자료처리 능력의 컴퓨터로 해결할 수 있으나 자칫 부정확한 입력자료나 精度가 낮은 scheme의 適用으로 인하여 실제 풍하중의 영향을 誤導시키는 위험성도 많다. 본 연구에서는 수치해석에 의한 다양한 기하학적 형태의 농업시설에 대한 풍하중분포 산정의 가능성을 검토하기 위하여, 單棟아치형하우스를 대상으로 $k-\epsilon$ 亂流모델 적용에 의한 풍력계수 분포를 결정하고 이의 결과를 NGAM(National Greenhouse Manufacturers Association), 日本農林水産技術會議에서 제시한 풍동실험에 의한 풍력계수와 비교하여 有意性을 檢定하였다.

2. 研究內容 및 方法

1) 研究內容

본 연구에서는 1) 2차원 층류 유동방정식인 Navier-Stokes 방정식을 2차원 난류 유동방정식으로 변환, 2) 2차원 직교좌표계의 난류 유동방정식을 2차원 곡선좌표계의 난류 유동방정식으로 전환, 3) 單棟 아치형 시설 주변의 擴大 風流動場의 流動條件 決定, 4) 수치해석에 의한 單棟 주변의 난류 유동장 해석, 5) 수치해석에 의한 單棟 아치형 시설 주변의 풍력계수분포 예측, 6) 수치해석에 의한 풍력계수와 풍동실험에 의한 풍력계수의 비교 · 검토하였다.

2) 分析方法

(1) 직선좌표계 확대 風流動場의 지배방정식

농업시설 주변 확대 유동장의 시설 외 · 내부 풍유동은 기본적으로 亂流流動이며, 이는 질량보전의 법칙, 운동량보전의 법칙, 에너지보전의 법칙의 지배를 받는다. 그러나 層流에 적용하는 일반적인 유체운동방정식인 Navier-Stokes 방정식을 그대로 적용할 수 없고 이를 亂流流動에 맞게 변형하여야 한다. 따라서 地點의 瞬間速度는 平均速度와 波動速度의 합과 같다는 통계학적 방법, 즉 $U_i = \bar{U}_i + u_i$ (이후, U 는 \bar{U} 를 의미함)을 이용하여 난류 평균유동의 지배방정식을 유도하였다. 난류지배방정식에 적

용되는 연속방정식 및 운동량보존방정식은 다음과 같다.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{U} = 0$$

$$\rho \frac{D\vec{U}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \vec{D}) + \nabla(\lambda(\nabla \cdot \vec{U})) + \rho \vec{f},$$

$$\text{단, } \vec{D} = \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}$$

여기서, U, V 는 직교좌표계의 水平 및 垂直分力速度 (m/s), ρ 는 密度 (kg/m³), μ 는 粘性係數 (kg·m/s), λ 는 第2 粘性係數(kg·m/s), f 는 體積力, \vec{D} 는 변형텐서(strain tensor)를 나타낸다. 亂流應力 <u_iu_j>은 Boussinesq이론을 도입한 기체운동이론의 개념을 도입하여 다음과 같이 tensor notation으로 표현하였다. 또한, 亂流점성계수를 구하기 위하여 본 연구에서는 난류운동에너지(k)는 난류유동의 속도帶를, 난류운동에너지의 消散率(ε)은 길이帶를 나타내는 표준 k-ε 난류모형을 적용하였다.

$$-\rho \langle u_i u_j \rangle = -\mu_t \vec{D} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad \mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$

여기서, μ_t 는 亂流 粘性係數 (kg·m/s), k 는 亂流流動 運動에너지 (m²/s²), δ_{ij} 는 Cronical delta를 나타낸다. 또한, ε 은 亂流流動 運動에너지의 消散率(m²/s³), C_μ 는 實驗常數이다.

직교좌표계에서의 風流動은 아래의 식의 連續方程式, 수평방향의 運動量轉移方程式, 수직방향의 運動量 轉移方程式, 亂流運動에너지 轉移方程式, 난류운동에너지의 消散率 轉移方程式의 지배를 받는다. U_x, U_y는 각각 ∂U/∂x, U(∂U/∂x)를 나타낸다.

- 연속 및 U,V 운동량 전이방정식 방정식

$$U_x + V_y = 0$$

$$U_t + UU_x + UV_y = -p_x + (2v_t U_x)_x + (v_t(U_y + V_x))_y$$

$$V_t + UV_x + VV_y = -p_y + (v_t(U_y + V_x))_x + (2v_t U_y)_y$$

- 난류에너지 전이(k) 및 소산율(ε) 방정식

$$k_t + (kU)_x + (kV)_y = (v_t \frac{k_x}{\sigma_1})_x + (v_t \frac{k_y}{\sigma_1})_y + v_t S - \varepsilon$$

$$\varepsilon_t + (\varepsilon U)_x + (\varepsilon V)_y = (v_t \frac{\varepsilon_x}{\sigma_2})_x + (v_t \frac{\varepsilon_y}{\sigma_2})_y + C_1 \varepsilon v_t \frac{S}{k} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$\text{단, } S = 2(U_x^2 + V_y^2) + (U_y + V_x)^2$$

여기서, v_t 는 亂流 動粘性係數 (m²/s), S 는 生成項, C₁, C₂, σ₁, σ₂ 는 常數이다.

Table 1. Value of constants in the turbulence model.

| C _μ | C _D | C ₁ | C ₂ | σ ₁ | σ ₂ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 0.09 | 1.0 | 1.44 | 1.92 | 1.0 | 1.3 |

(2) 곡선좌표계의 격자생성

Fig.1과 같은 제어체적의 유동장을 곡선좌표계로 표현하기 위하여 Laplace 방정식과 Poisson 방정식을 이용하여 직교계의 좌표를 곡선계의 좌표로 변환하였다. 일반적으로

로 Laplace방정식을 이용한 격자망 생성법은 대상시설의 형상이 복잡할 경우, 유연한 경계면을 표현할 수 없기 때문에, Poisson 방정식을 이용하여 경계면 근처의 격자생성 때 곡률을 조절할 수 있는 제어함수를 사용하였다.

$$\xi = \xi(x, y), \quad \eta = \eta(x, y)$$

$$\xi_{xx} + \xi_{yy} = P(\xi, \eta), \quad \eta_{xx} + \eta_{yy} = Q(\xi, \eta)$$

$$\text{단, } \xi_x = \frac{y_\eta}{J}, \quad \xi_y = -\frac{x_\eta}{J}, \quad \eta_x = -\frac{y_\xi}{J}, \quad \eta_y = \frac{x_\xi}{J}$$

$$J = (x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi) = (\xi_x \eta_y - \xi_y \eta_x)^{-1}$$

여기서, ξ 및 η 는 곡선좌표계의 수평 및 수직방향, ξ_x, η_x 은 각각 $\partial\xi/\partial x$ 및 $\partial\eta/\partial x$, P 및 Q 는 제어함수이다.

(3) 解析手順

지배방정식은 2차원 정상상태, 재순환 난류모델에 대해서 엇갈림 격자(staggered grid)를 사용하여 $U, V, P, C, k, \varepsilon$ 원시변수에 관하여 이산화하였다. 差分方程式은 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)를 이용하여 해석하였고, 표준적인 Gauss해법에 근거한 TDMA(TriDiagonal-Matrix Algorithm: 3대각 행렬 알고리즘)이 포함 되어 있다. 압력과 연속방정식의 만족시키는 문제가 핵심이며 기본 논리는 다음과 같다(Fig.2).

①: 壓力場 가정, ②: 假定 壓力場을 運動量方程式에 적용하여 速度場계산, ③: 各 微小制御體積에 대한 連續方程式 誤差의 定式化, ④: 壓力修正 式에 의한 壓力修正 場계산, ⑤: 壓力場과 速度場의 再計算, ⑥: ⑤의 壓力場을 假定 壓力場으로 하여 연속식과 운동량보전식에 대한 誤差가 許容範圍에 들 때까지 ②~⑤의 과정반복)
(②, ⑤의 速度場은 운동량보전의 법칙은 만족시키나 연속방정식은 만족시키지 못함)

3. 結果 및 考察

1) 시설 주위의 유동장 해석

Fig.1은 단동 아치형 시설의 곡선좌표계 계산영역을 나타낸 것이다. 좌측 風上側 속도형상은 수치해석상 기법도입의 어려움 때문에 다음 모형으로 계산된 속도를 높이에 따라 離散化하여 적용하였다. Fig.3의 공기유동은 기본적으로 平板型 자유흐름에 의한 유동이지만 이를 風洞實驗으로 유동을 분석하였기 때문에, 正方形 덕트유동으로도 해석할 수 있다. 이 때의 Reynolds數는 $10^4 \sim 10^5$ 에 이르러 경계층이 뚜렷하게 나타나는(경계층 두께가 수cm 또는 수mm 범위) 난류유동으로 특성화할 수 있다.

Fig.4은 시설 주변의 변형텐서 $\partial U_i / \partial x_j$ 의 분포를 나타낸 것이다. 변형텐서의 분포는 압력분포와 함께 난류경계층류를 風上側의 속도형상으로 수용할 때의 단동 시설 주변의 풍속유동형태를 분석하기 위한 또 하나의 중요한 자료가 될 수 있다.

2) 풍압계수 분석

Fig.5의 (a)는 日本農林水産技術會議 事務局에서 원예시설 설계기준으로 풍동실험에 의하여 제시한 풍력계수(C_r : 以後 日本基準이라함)이며, (b)는 美國 National Greenhouse Manufacturers Association에서 제시한 설계기준으로 제시한 풍력계수(以後 美國基準이라함)의 값이다. 본 연구에서 이론적으로 구한 局部 풍력계수는 (c)이며, (d)는 이들의 평균값을 나타낸 것이다.

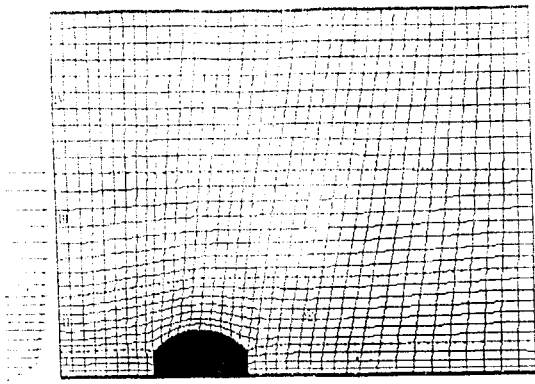


Fig.1. Calculation domain with Body-Fitted Coordinate system for a single span greenhouse.

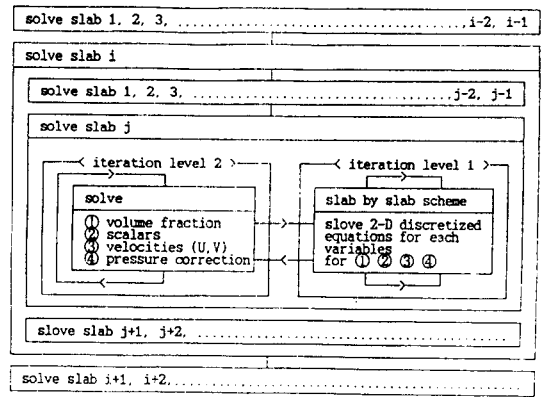


Fig.2. Solution algorithm for 2-D discretized equations.

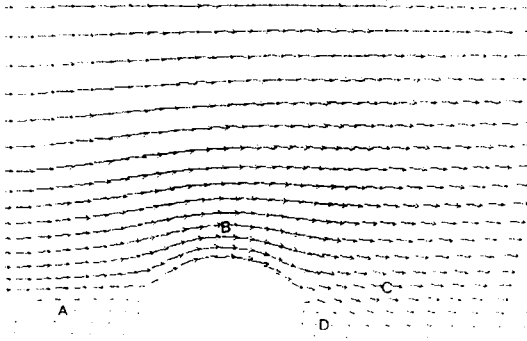


Fig.3. Calculated flow patterns around a single span greenhouse at the velocity profile on boundary layer flow.

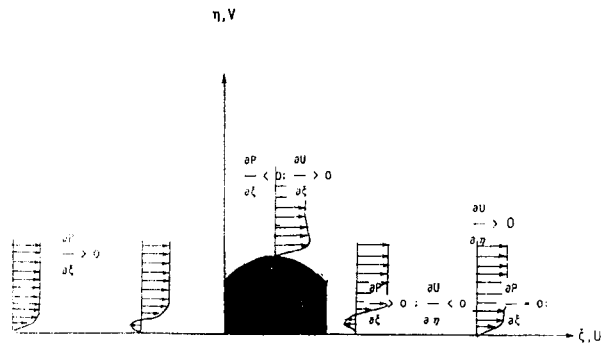


Fig.4. Distribution of pressure slope $\partial P / \partial \xi$ around a single span greenhouse.

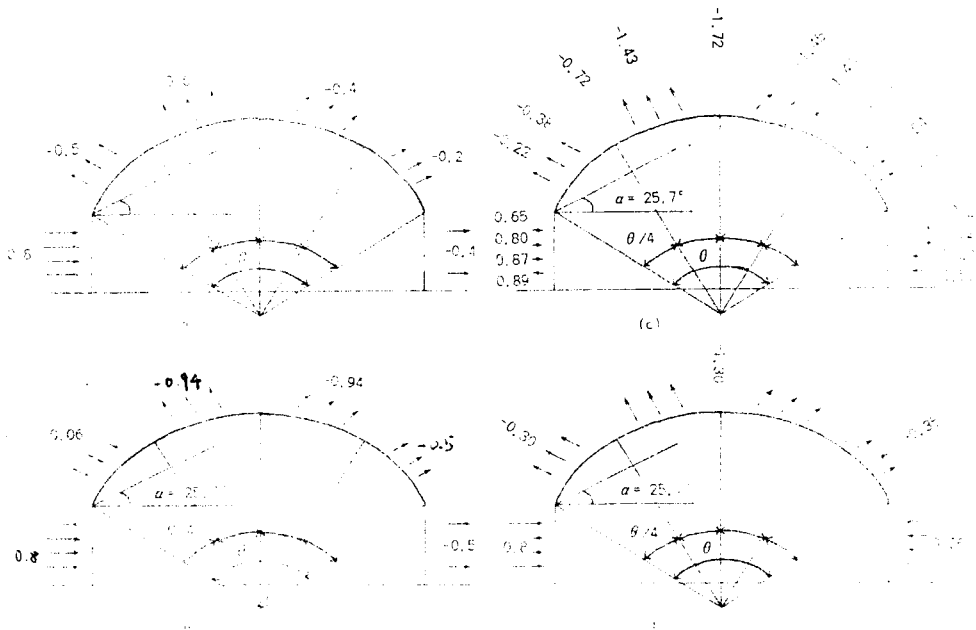


Fig.5. Distribution of wind pressure coefficients around a single span greenhouse. (a) Japanese standard, (b) American standard, (c) Local values by numerical model, (d) Mean values by numerical model.