

風荷重이 農業施設物의 構造的 安定성에 미치는 影響 —數値해석에 의한 風力係數分布 算定—

崔弘林·孫禎翼
서울大學校 農業生命科學大學

The Effect of Wind Force on Stability of Agricultural Structures — Numerical Calculation of Wind Pressure Coefficients —

Choi, Hong-Lim · Son, Jung-Eek
College of Agr. & Life Sciences, Seoul Nat'l Univ., Suwon 441-744

Summary

Wind load is known to be one of major forces to influence the stability of agricultural structures. General flow fields were calculated to determine flow characteristics over the envelop of the following three types of greenhouses with arched roof; single span, twin span greenhouses, and two single span greenhouses apart 3m inbetween.

Pressure coefficients along the envelop of greenhouse were numerically calculated by the $k-\epsilon$ turbulence model, which lead to determine wind forces on it. Curvilinear coordinate for an arched roof and the upwind scheme were adopted for the study. The calculated pressure coefficients were validated with the available data of Japanese Standard and NGAM Standard.

The Magnitude of calculated forces over the envelop was not in good accordance with data except the windward wall. Even the data of Japanese and NGAM Standard for validation deviated a lot from each other in quantity and quality. Such discrepancy may be attributed to different geometric and/or flow configuration conditions for experiments, or the insensitivity of the $k-\epsilon$ turbulence model to recirculation flow.

키 워 드 : 農業施設, 構造設計, 風荷重, 風力係數, $k-\epsilon$ 亂流모델

Key words : agricultural structure, structural design, wind force, wind pressure coefficients, $k-\epsilon$ turbulent model

序 論

對象 農業施設의 構造設計를 위해서는 기상자료의 빈도분석에 의한 設計荷重 算定을 통하여 構造

的 安定성이 성립되는 범위내에서 所要強度를 발휘하는 適正部材를 결정해야 한다¹⁾. 일반적으로 農業施設의 構造的 안정에 영향을 미치는 荷重은 風荷重과 雪荷重으로 알려져 있다^{2,3)}. 일반적으로

본 연구는 농어촌진흥공사 연구용역비(93-05-19)로 수행되었음.

풍하중을 계산하기 위해서는 기준높이의 속도압에 局部 풍력계수를 곱하여 구할 수 있다^{1,2,3,6)}. 따라서 농업시설물의 周長(envelop)에 沿한 局部 풍력계수의 분포를 결정할 수 있다면, 풍하중의 분포를 쉽게 계산할 수 있고, 이는 농업시설물의 구조적 안정성을 판단하는 기준을 제공한다.

일반적으로 풍력계수의 산정방법은 風洞實驗에 의한 실험방법과 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 변형 비용과 시간이 너무 많이 드는 단점이 있다. 수치해석은 풍동에 의한 분석의 단점인 변형비용과 시간은 경제조건의 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^{4,5)}. 일반적으로 난류상태의 공기유동해석을 위하여 $k-\epsilon$ 亂流 모델을 사용하는 것이 보편화 되어있고, 適用例도 상당부분 제시되어 있다^{7,8,12)}.

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)¹³⁾, 日本農林産技術會議⁶⁾에서 제시한 풍동실험에 의한 풍력계수와 비교하였다.

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, 2連棟 아치형 및 棟間隔이 있는 2連棟 아치형 시설 주변의 擴大 風流動場의 流動條件 決定, 4)수치해석에 의한 單棟, 2連棟 시설 주변의 난류 유동장 해석, 5)수치해석에 의

한 單棟 아치형 시설 주변의 풍력계수분포 예측, 6)수치해석에 의한 풍력계수와 풍동실험에 의한 풍력계수를 비교·검토하였다.

2. 分析方法

1) 직선좌표계 확대 風流動場의 지배방정식

Fig. 1과 같은 농업시설 주변 확대 유동장의 시설 외·내부 풍유동은 기본적으로 亂流流動이며, 이는 질량보존의 법칙, 운동량보존의 법칙, 에너지보존의 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. 그러나 난류유동을 지배하는 운동방정식의 직접적인 유도는 現代物理學으로는 불가능하므로, 地點의 瞬間速度 U_i 는 平均速度 U_i 와 波動速度 u_i 의 합과 같다는 통계학적 방법(1식)을 이용하여 난류 평균유동의 지배방정식을 유도할 수 있다.

$$U_i = U_i + u_i \quad (1)$$

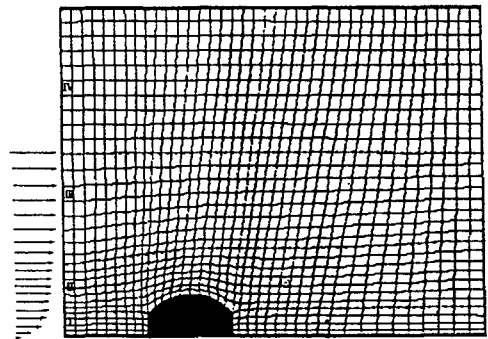


Fig. 1. Calculation domain with Body-Fitted Coordinate system for a single span greenhouse.

기본적으로 난류지배방정식의 적용되는 연속방정식 및 운동량보존방정식은 다음과 같다. 본 연구의 범위인 비정상상태, 비압축성유체의 경우는 $\frac{D\rho}{Dt}, \nabla \cdot U = 0$ 을 만족한다.

가) 연속방정식 :

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot U = 0 \quad (2)$$

나) 운동량보존방정식 :

$$\rho \frac{DU}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu D) + \nabla(\lambda(\nabla \cdot U)) + \rho f \quad (3)$$

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

여기서, U_i, U_j 는 직교좌표계의 水平 및 守直分力 速度(m/s), ρ 는 密度(kg/m³), μ 는 粘性係數(kg · m/s), λ 는 粘性係數(kg · m/s), f 는 體積力, D 는 변형텐서(strain tensor)를 나타낸다.

난류운동방정식을 평균처리하면 亂流應力 $\langle u_i u_j \rangle$ 과 스칼라플럭스 $\langle u_i \phi \rangle$ 등이 생성되며, 이를 다시 定式化하면, 高階(higher order)의 편미분방정식으로 표현되기 때문에 거의 해석이 불가능해진다. 따라서 미지의 난류응력/스칼라플럭스를 모형화하기 위하여 Boussinesq이론을 도입한 기체운동이론의 개념을 도입하였다. 즉, 난류운동의 流體群도 기체운동을 하며, 層流의 분자 粘性應力을 模似하여 난류응력도 평균속도 기울기에 비례한다고 가정하여 이를 tensor notation으로 표현하면 식(4)와 같다.

$$-\rho \langle u_i u_j \rangle = -\mu D - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4)$$

여기서, μ 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.

식(4)의 亂流점성계수를 구하기 위하여 본 연구에서는 난류운동에너지(k)는 난류운동의 속도 帶를, 난류운동에너지의 消散率(ϵ)은 길이 帶를 나타내는 표준 $k-\epsilon$ 난류모형을 적용하였다.

$$\mu = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

여기서, ϵ 은 亂流流動 運動에너지의 消散率(m²/s²), C_{μ} 는 實驗常數이다.

직교좌표계에서의 風流動은 아래의 식(6)의 連續方程式, 식(7)의 수평방향의 運動量轉移方程式, 식(8)의 수직방향의 運動量 轉移方程式, 식(9)의 亂流運動에너지 轉移方程式, 식(10)의 난류운동에

너지의 消散率 轉移方程式의 지배를 받는다. 여기서 U_x, UU_x 는 각각 $\partial U/\partial X, U(\partial U/\partial X)$ 를 나타낸다.

가) 연속방정식 :

$$U_x + V_y = 0 \quad (6)$$

나) U-운동량 전이방정식 :

$$U_t + UU_x + UV_y = -p_x + (2\nu_t U_x)_x + (\nu_t(U_y + V_x))_y \quad (7)$$

다) V-운동량 전이방정식 :

$$V_t + UV_x + VV_y = -p_y + (\nu_t(U_y + V_x))_x + (2\nu_t V_y)_y \quad (8)$$

라) 난류에너지 전이방정식(k) :

$$k_t + (kU)_x + (kV)_y = (\nu_t \frac{k_x}{\sigma_1})_x + (\nu_t \frac{k_y}{\sigma_1})_y + \nu_t S - \epsilon \quad (9)$$

마) 난류에너지 소산율 방정식(ϵ) :

$$\epsilon_t + (\epsilon U)_x + (\epsilon V)_y = (\nu_t \frac{\epsilon_x}{\sigma_2})_x + (\nu_t \frac{\epsilon_y}{\sigma_2})_y + C_{1\epsilon} \nu_t \frac{S}{k} - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (10)$$

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

여기서, ν_t 는 亂流 動粘性係數(m²/s), S 는 生成項, $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, \sigma_1, \sigma_2$ 는 常數이다.

2) 곡선좌표계의 격자생성

Fig. 1과 같은 제어체적의 유동장은 직교좌표계로 표현할 수 없고, 곡선좌표계로 표현해야 한다. 이를 일반화하기 위하여 Laplace 방정식과 Poisson 방정식(12식)을 이용하여 직교계의 좌표를 곡선계의 좌표로 변환하여야 한다. 이렇게 변환된 직교좌표영역에서 방정식을 풀고 물리적 공간의 해당격자점에서 필요한 값들을 역변환하면 된다. Jacobian(J)은 식(14)와 같이 定義되며 $\xi, \xi_y, \eta_x, \eta_y$ 은 J를 이용하여 식(13)과 같이 定義할 수 있다.

$$\xi = \xi(x, y), \eta = \eta(x, y) \quad (11)$$

$$\xi_{xx} + \xi_{yy} = P(\xi, \eta), \quad \eta_{xx} + \eta_{yy} = Q(\xi, \eta) \quad (12)$$

$$\text{단, } \xi_x = \frac{y\eta}{J}, \quad \xi_y = -\frac{x\eta}{J}, \quad \eta_x = \frac{y\xi}{J}, \quad \eta_y = \frac{x\xi}{J} \quad (13)$$

$$J = (x\xi y\eta - x\eta y\xi) = (\xi_x \eta_y - \xi_y \eta_x)^{-1} \quad (14)$$

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 Q는 제어함수이다. 일반적으로 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 사용한다. 따라서 제어함수는 Laplace방정식을 만족시키는 좌표계를 Poisson방정식을 만족시키는 좌표계로 변환할 수 있다¹¹⁾.

3) 곡선좌표계에 의한 확대 風流動場의 지배방정식

Fig. 1와 같은 확대 流動場의 시설 外 · 内部 風流動은 기본적으로 亂流流動이며, 이 난류운동은 식(6)~식(10)의 지배를 받는다. 그러나 이 식들은 직교좌표계에서 유도한 식이므로 Fig. 1과 같은 곡선계산영역에서는 이를 적용할 수 없고 이를 곡선좌표계로 변환시키면 다음과 같다. 逆變換벡터 W와 Z는 直交座標系의 垂直分力(U), 水平分力(V)벡터의 함수로 식(16)과 같이 정의할 수 있다.

가) 連續方程式

$$\frac{(JW)_\xi + (JZ)_\eta}{J} = 0 \quad (15)$$

$$\text{단, } W = \xi_x U + \xi_y V; \quad Z = \eta_x U + \eta_y V \quad (16)$$

나) W-運動量 轉移방정식

$$\begin{aligned} JW_t + (JWW)_\xi + (JWZ)_\eta = & -(J\xi_x \rho)_\xi - (J\eta_x \rho)_\eta \\ & + (Jv_t((2\xi_x^2 + \xi_y^2)U\xi + (2\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y)U_\eta \\ & + \xi_x \xi_y V\xi + \xi_y \eta_x V_\eta))_\xi + (Jv_t((2\eta_x \xi_x \\ & + \eta_y \xi_y)U\xi + (2\eta_x^2 + \eta_y^2)U_\eta + \eta_y \xi_x V\xi \\ & + \eta_x \eta_y V_\eta))_\eta \end{aligned} \quad (17)$$

다) Z-運動量 轉移방정식

$$JZ_t + J(JWZ)_\xi + (JZZ)_\eta = -(J\xi_y \rho)_\xi - (J\eta_y \rho)_\eta$$

$$\begin{aligned} & + (Jv_t((\xi_x^2 + 2\xi_y^2)V\xi + (\xi_x \eta_x + 2\xi_y \eta_y)V_\eta \\ & + \xi_x \xi_y U\xi + \xi_y \eta_x U_\eta))_\xi + (Jv_t((\eta_x \xi_x \\ & + 2\eta_y \xi_y)V\xi + (\eta_x^2 + 2\eta_y^2)V_\eta \\ & + \eta_y \xi_x U\xi + \eta_x \eta_y U_\eta))_\eta \end{aligned} \quad (18)$$

라) 난류운동에너지 轉移방정식(k)

$$\begin{aligned} Jk_t + (JWk)_\xi + (JZk)_\eta = & \\ & (Jv_t \frac{(\xi_x^2 + \xi_y^2)k\xi + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y)k_\eta}{\sigma_1})_\xi \\ & + (Jv_t \frac{(\eta_x \xi_x + \eta_y \xi_y)k\xi + (\eta_x^2 + \eta_y^2)k_\eta}{\sigma_1})_\eta \\ & + Jv_t S - J\varepsilon \end{aligned} \quad (19)$$

마) 亂流運動에너지의 消散率 轉移방정식(ε)

$$\begin{aligned} J\varepsilon_t + (JW\varepsilon)_\xi + (JZ\varepsilon)_\eta = & \\ & (Jv_t \frac{(\xi_x^2 + \xi_y^2)\varepsilon\xi + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y)\varepsilon_\eta}{\sigma_2})_\xi \\ & + (Jv_t \frac{(\eta_x \xi_x + \eta_y \xi_y)\varepsilon\xi + (\eta_x^2 + \eta_y^2)\varepsilon_\eta}{\sigma_2})_\eta \\ & + JC_1 \varepsilon v_t \frac{S}{k} - JC_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{단, } S = & 2 \left(\frac{(J\xi_x U)_\xi + (J\eta_x U)_\eta}{J} \right)^2 \\ & + 2 \left(\frac{(J\xi_y V)_\xi + (J\eta_y V)_\eta}{J} \right)^2 \\ & + \left(\frac{(J\xi_y U + J\xi_x V)_\xi + (J\eta_y U + J\eta_x V)_\eta}{J} \right)^2 \end{aligned}$$

여기서, W, Z는 곡선좌표계의 수평 및 수직분력벡터(m/s), P는 곡선좌표계의 압력(kg/m²)이다. 위의 방정식에 사용되는 상수는 Table 1과 같다.

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

4) 解析手順

지배방정식은 2차원 정상상태, 재순환 난류모델에 대해서 엇갈림 격자(staggered grid)를 사용하여 U, V, P, C, K, ε 원시변수에 관하여 이산화하였다. 差分方程式은 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)를 이용하여 해

석하였고, 표준적인 Gauss해법에 근거한 TDMA (TriDiagonal-Matrix Algorithm:3대각 행렬 알고리즘)이 포함되어 있다.

가) 難散化方程式 定式化

본 연구에서 해석하고자 하는 바닥면으로부터의 열플럭스에 의한 난방공간의 공기유동과 열전달에 관한 물리적인 현상을 지배하는 식, 連續方程式, 運動量轉移方程式, k-轉移方程式, ε-轉移方程式의 유한체적법(Finite Volume Methods:FVM)에 의한 미분형 k-ε 난류모형 (2-방정식모형)의 정상 2차원 난류유동의 難散化방정식은 다음과 같다. 식(21)를 微小制御體積에서 구하고자 하는 ϕ_P 에 대해서 풀면 식(22)와 같다.

$$a_P \phi_P = a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_E \phi_E + a_W \phi_W + b \quad (21)$$

$$\phi_P = \frac{1}{a_P} (a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_E \phi_E + a_W \phi_W + b) \quad (22)$$

단, $a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^0 - S_P \Delta x \Delta y$

$$a_P^0 = \frac{\rho \phi^0 \Delta x \Delta y}{\Delta t}, \quad b = S_C \Delta x \Delta y + a_P^0 \phi_P^0$$

여기서, a_P^0 , ϕ_P^0 는 각각 Δt 시간전의 값을 의미한다.

(1) 스칼라場, 速度場의 제어체적

2-D는 제어체적중 x-y평면을 예를 들면, Fig. 2와 같이 스칼라량을 위한 제어체적도에서 구하고자 하는 격점 P에서의 스칼라 양, ϕ_P 는 미소체적 ①을 제어체적으로 하여 이웃하는 점 E, W, N, S의 값에서 P점의 값을 구할 수 있다. Fig. 2a의 제어체적 ①에서 식(2)를 적용시켜 미지수 ϕ_P 를 구한다. 그러나 속도는 제어체적 각 면에 Fig.2b와 같이 수평속도 U_P 의 제어체적은 ②, V_P 의 제어체적은 ③으로 정의하여 ϕ_P 의 미소제어체적의 질량 보존의 법칙을 만족하도록 하였다.

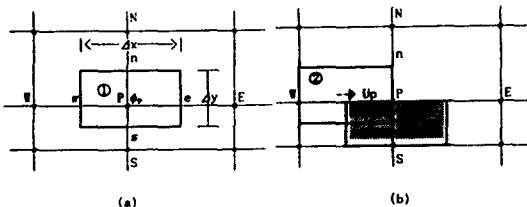


Fig. 2. 2-D calculation domains for (a) scalar ϕ and (b) velocity (staggered grid).

(나) 대류, 확산항의 계수에 대한 기여도
이산화방정식의 계수 a_x 들은 대류(convection)와 확산(diffusion)으로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 Fig. 2에 주어진 것과 같이 미소제어체적에 대류항은 upwind scheme을 擴散項에는 upwind scheme 또는 hybrid schme을 선택적으로 적용할 수 있게 하였다. 또한 시간계수 a_T 도 前時間帶에 대해서는 explicit scheme을 現時間帶에 대해서는 implicit scheme을 적용하였다.

예를 들어, Fig. 2의 스칼라 및 속도 제어체적을 이용하여 식(21) 또는 식(22)의 a_E 의 대류항의 기여값, 확산항의 기여값, 시간항의 기여값을 결정하면 다음과 같다. 기타 상세한 사항은 참고문헌을 참고하기 바람^{4,5,10}.

$$\text{확산항} : D_e = \frac{\gamma_P + \gamma_E}{2} \frac{A_e}{|Pe|} [1.0 - \zeta |Pe|] \quad (23)$$

$$\text{대류항} : F_e = \rho_P \phi_P A_E [U_e] - \rho_E \phi_E A_E [-U_e] \quad (24)$$

단, $Pe = F_e / D_e$: Peclet數

여기서, $\zeta = 0.0$ 이면, upwind scheme : $\zeta = 0.5$ 이면, hybrid scheme을 적용한다.

그러므로 식(21) 또는 식(22)의 계수 a_E 의 값은 확산기여항 식(23)과 대류기여항 식(24)를 합성하여 식(25)와 같이, 시간항 a_T 는 식(26)과 같이 결정하였다.

$$a_E = D_e + F_e = \frac{\gamma_P + \gamma_E}{2} \frac{A_e}{|Pe|} [1.0 - \zeta |Pe|] + \rho A_E [-U_e] \quad (25)$$

$$a_T = \frac{V_P}{\Delta t} \rho \quad (26)$$

(다) 虛僞時間項

본 연구에서는 SIMPLE계열 알고리즘의 수렴성을 향상시키기 위하여 이산화방정식(21)에 虛僞時間項(false transient term)을 적용시켰다.

$$a_P \phi_P = a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_E \phi_E + a_W \phi_W + b + FTT \quad (27)$$

단, $FTT = \rho V_P (\phi_P^0 - \phi_P) / \Delta t_i$

여기서, FTT는 또 다른 하나의 생성항으로 작용하여 구하고자 하는 종속변수의 前段階 값과 現段階 값의 변화의 폭을 감소시켜 요즘 유체동력학의

수치해석에서 널리 쓰이는 下向弛緩(under-relaxation)과 같이 수렴(convergence)을 개선하는 효과가 있다.

(2) SIMPLE系列 Algorithm

SIMPL은 Semi-Implicit Methods for Pressure-Linked Equations를 나타낸다. 이 알고리즘은 압력과 연속방정식을 만족시키는 문제가 핵심이며 기본 논리는 Fig. 3과 같다.

- 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 公式化
 - ④ 壓力修正式에 의한 壓力修正分 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 연속방정식과 운동량보존식에 대한 誤差가 許容範圍에 들 때까지 ②~⑤의 과정을 반복
- (단, ②, ⑤에서 구한 速度場은 운동량보존의 법칙은 만족시키나 연속방정식은 만족시키지 못함)

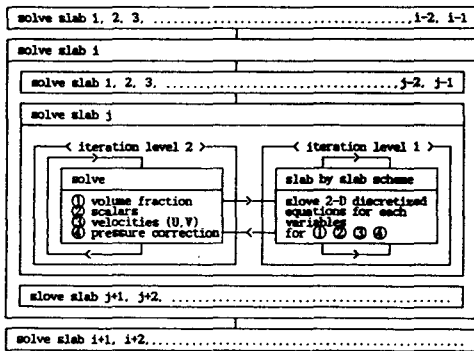


Fig. 3. Solution algorithm for 2-D discretized equations.

結果 및 考察

1. 單棟 아치형 시설의 流動特性

- 1) 시설 주위의 유동장 해석
- Fig. 1은 단동 아치형 시설의 곡선좌표계 계산

영역을 나타낸 것이다. 좌측 風下側 속도형상은 수치해석상 기법도입의 어려움 때문에 다음 모형으로 계산된 속도를 높이에 따라 難散化하여 적용하였다.

$$\frac{V(z)}{V_\alpha} = \left(\frac{z}{z_\alpha}\right)^\alpha \quad (28)$$

여기서, V는 고도 z에서의 풍속(m/s), V_α는 경고도 z_α에서의 풍속, α=0.12이다.

Fig. 4의 공기유동은 기본적으로 平板型 자유흐름에 의한 유동이지만 이를 風洞實驗으로 유동을 분석하였기 때문에, 正型 터트유동으로도 해석할 수 있다. 이 때의 Reynolds數는 10⁴~10⁵에 이르러 경계층이 뚜렷하게 나타나는 (경계층 두께가 수cm 또는 수mm범위) 난류유동으로 특성화할 수 있다. 일반적으로 경계층류가 風上側에서 발생할 때 Fig. 4의 A지역에서 유동의 離현상을 관찰할 수 있다. Fig. 5에서 수평방향의 속도기울기와 압력기울기를 相關시켜 可視化한것과 같이, 기본적으로 유체가 벽면 가까이에서 증가하는 압력기울기(dP/dx>0) 즉, 逆壓力기울기를 대항하면서 유동할 때, 과도한 운동량 손실로 인하여 발생하는 현상으로 알려져 있다. 그러나 Fig. 4의 D지역에서는 vortex trailing eddy인 後流(wake)를 관찰할 수 있으며, 이는 매우 강한 난류유동으로 알려져 있다. Fig. 4의 A와 D지역의 渦流(eddy)의 압력은 기본적으로 참조점(또는 대기압) 압력보다 낮으며 負壓의 원인이 되는 강한 난류를 생성시킨다.

이는 Fig. 4와 같은 기하학적 條件下에서도 유동조건이 다를 경우, 유동의 박리현상을 관찰할 수도 있고, 하지 못할 수도 있다. 地表高에 따른 속도기울기를 현 code에서 수용할 수 없어, 단동인 경우, Fig. 1의 風下側 속도형상중 지역 I의 속도를 지역 II의 속도와 같은 等速流를 적용하면, Fig. 4의 A지역과 같이 유동의 박리현상을 관찰할 수 없다. 이는 경계층간의 下向 運動量轉移가 충분히 크지 못하여 하나의 渦流를 형성하지 못하고, 유동의 측면에서 보면 방해물이 되는 시설의 좌측벽을 따라 질량보존의 법칙에 의하여 上向流線을 형성한다. 그러나, 境界層流의 效果를 얻기 위하여 Fig. 1의 風上側 속도형상중 지역 I의 속도를 0으로 하여 지역 II와 풍속차를 11m/s 큰 下向 運動量轉移가 일어나도록 유도하였을 때,

Fig. 4의 A지역과 같이 유동의 박리현상에 의한 standing vortex를 관찰할 수 있다. 그러므로 지점 ㉑는 停滯點을 형성한다.

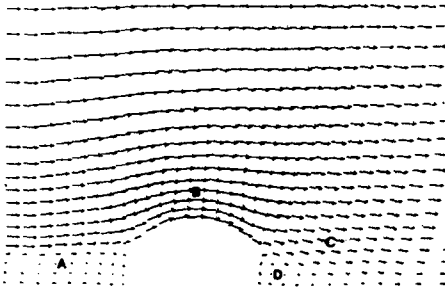


Fig. 4. Calculated flow patterns around a single span greenhouse at the velocity profile on boundary layer flow.

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7은 시설 주변의 변형텐서 $\partial U_i/\partial x_j$ 의 분포를 나타낸 것이다. 변형텐서의 분포는 Fig. 10의 압력분포와 함께 난류경계층류를 風上側의 속도형상으로 수용할 때의 단동 시설 주변의 풍속유동형태를 분석하기 위한 또 하나의 중요한 자료가 될 수 있다. 그림과 같이 主風向(ξ -방향)으로 풍속기울기의 차이도 크지만, 지역에 따라서는 主風의 수직방향(η -방향)의 풍속기울기도 큰 차이를 보였다. 간단한 경계층 유동의 경우 $\partial U/\partial \eta$ 의 속도기울기를 主變形 텐서로 고려할 수 있으나, 대부분의 경우, 방해물(그린하우스) 주변의 속도장 해석은 매우 복잡하기 때문에 이 하나의 속도기울기를 유동장을 결정하는 主剪斷力으로 해석하는 것은 매우 위험하다.

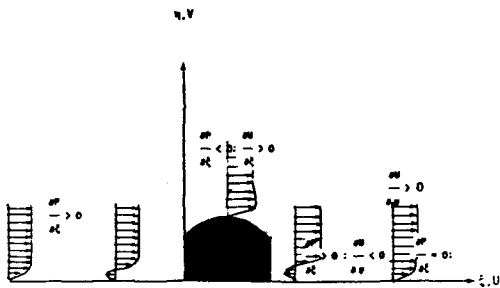


Fig. 5. Distribution of pressure slope $\partial P/\partial \xi$ around a single span greenhouse.

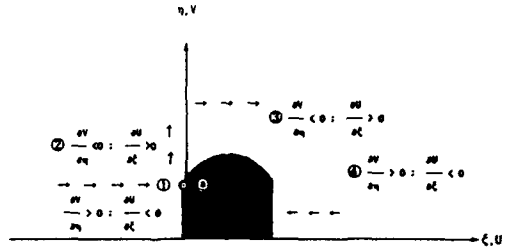


Fig. 6. Distribution of velocity slopes $\partial V/\partial \eta$, $\partial U/\partial \xi$ around a single span greenhouse.

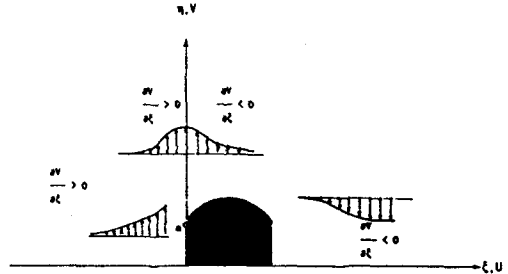


Fig. 7. Distribution of velocity slopes $\partial V/\partial \xi$ around a single span greenhouse.

2) 풍압계수 분석

일반적으로 바람에 의한 풍압은 시설의 단위 피복면에 수직되게 작용하는 하중을 말하며, 피복면에서의 陽壓은 하중의 向面性을, 陰壓은 하중의 離面性을 나타낸다. 식(29)에서 정의한 無次元 풍압계수는 特定地點에서 時間帶 평균속도의 V에 의한 局部 평균 풍압계수(C_p)를 나타내며, 이는 시설의 피복면의 압력분포를 결정하는데 필요하다.

$$C_p = \frac{P}{q} \tag{29}$$

여기서, $q = \frac{1}{2} \rho V_i^2$, V_i 는 局部 풍속(m/s)이다.

또한 風力계산에 기본이 되는 風力係數는 식(29)의 局部 평균압력계수를 受壓面積에서 적분하여 이를 단위면적으로 나눈 값으로, 흔히 평균 풍압계수라고도 하며 식(30)과 같이 定義한다.

$$C_f = \frac{\iint_{area} P d\xi d\eta}{qA} \tag{30}$$

Fig. 8의 (a)는 日本農林水産技術會議 事務局에

서 원예시설 설계기준으로 풍동실험에 의하여 제시한 풍력계수(C_f :以後 日本基準이라 함)이며, (b)는 美國 National Greenhouse Manufacturers Association에서 제시한 설계기준으로 제시한 풍력계수(以後 美國基準이라 함)의 값이다^{6,13}. 본 연구에서 이론적으로 구한 局部 풍력계수는 (c)이며, (d)는 이들의 평균값을 나타낸 것이다. Fig. 8의 (a)와 (b)를 보듯이 風上壁과 風下지붕 1/4면에서는 미국기준과 일본기준의 차이가 거의 없으나, 風上지붕의 1/4면과, 지붕중앙 1/2면에서는 두 값間 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 서로 다른 실험조건에서 오는 문제인 듯하나 참고한 문헌에서 구체적으로 실험에 관한 記述이 없었다.

Fig. 8의 (c)는 수치해석에 의한 風上, 豐下壁 및 지붕에 대한 局部 풍력계수를 (이하 理論값이라 함), (d)는 이의 平均을 나타낸 것이다. 流動이 豐風上壁과 垂直될 때, 風上壁의 평균 풍력계수는 0.8로서 일본기준이나 미국기준과 같았다. 그러나 풍상지붕의 1/4면의 경우 미국값은 +0.06을, 일본값은 -0.5를 提示하여 극단적인 차이를 보였으며, 수치해석에 의한 값은 두 값의 중간정도인 -0.30을 타나내었다. 지붕중앙의 1/2면에서도 일본기준은 -0.4~0.6, 미국기준은 -0.94를 제시하였으며, 수치해석에 의한 값은 -1.3 정도로 相互 계수값의 차이가 매우 심하였다.

風下지붕의 1/4면에서는 수치해석에 의한 평균값은 -0.35로서 -0.2의 일본기준보다는 크고, -0.5의 미국기준보다는 적어서 기준이 되는 근거 설정이 모호하였다. 風下壁에서는 미국기준과 일본기준은 각각 -0.5, -0.4로 서로 거의 같으며 풍력이 피복면에 背하여 작용하나, 평균 이론값은 +0.06으로 오히려 피복면을 向하여 작용하였다. 그러나 이를 좀 더 자세히 관찰하면(Fig. 8의 (c)), 풍하벽 윗 부분은 풍력이 피복면을 背하여 작용하고, 아랫 부분은 向하여 작용하고 있음을 알 수 있다. 즉, Fig. 8의 D지역에서도 확인할 수 있듯이, 와류가 시계방향으로 유동하면서 재순환되므로 풍하벽 上部에서는 속도벡터가 피복면을 중심으로 背하며, 下部에서는 向하므로 풍력벡터

가 混在되어 있어야 한다. 그러나, 미국 및 일본 기준 모두 제시한 값에 대한 구체적인 배경 설명이 없어 판단하기 어려우나, 이 두 기준값이 渦流流動을 고려한 평균값이라 假定하였다.

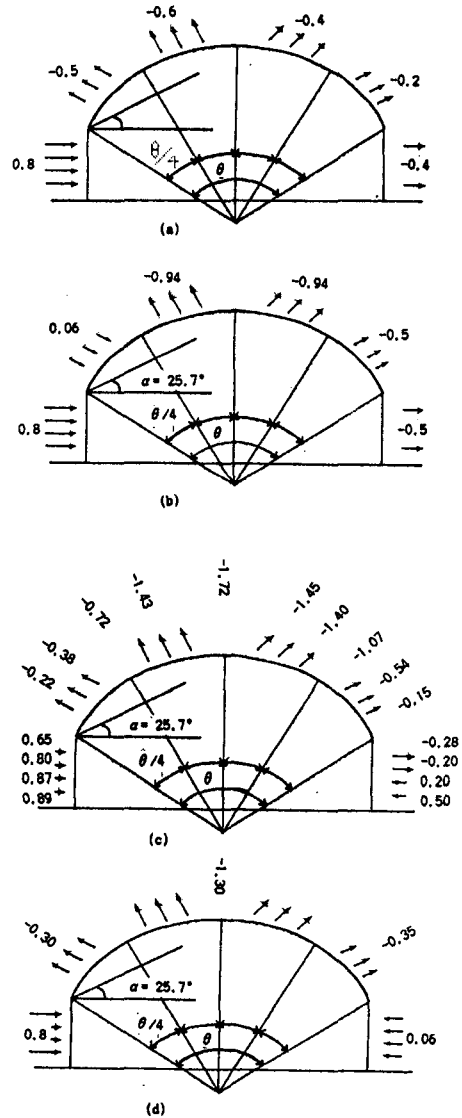


Fig. 8. Distribution of wind pressure coefficients around a single span greenhouse. (a) Japanese standard, (b) American standard, (c) Local values by numerical model, (d) Mean values by numerical model.

2. 2連棟 아치형 시설의 유동장 해석

2連棟 시설 주변의 風流動 형태를 위한 곡선좌표계는 Fig. 1과 동일한 형태이고 단동대신에 연동을 적용하였다. 경계층 난류가 風上側에서 Fig. 9의 A 지역에 유동의 剝離현상을 관찰할 수 있다. 2연동 주변의 유동장은 기본적으로 單棟의 주변 풍속장의 해석과 같이 운동량 전이의 크기에 따라 다르며, 2연동 시설 주변의 변형텐서($\partial U_i/\partial x_j$)의 분포 및 압력분포도 單棟의 경우와 비슷하였다.

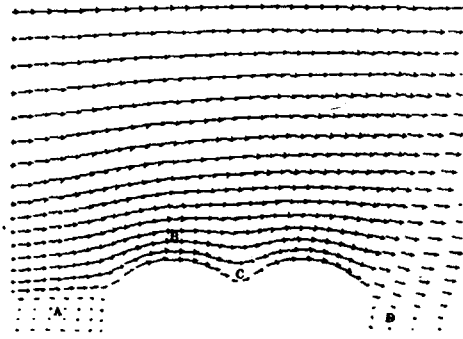


Fig. 9. Calculated flow patterns around a twin span greenhouse at the velocity profile on boundary layer flow.

이러한 類似性은 시설의 幾何學的 형태에 기인하거나, 본 연구에서 적용한 난류모형인 $k-\epsilon$ 모형이 내포하고 있는 본질적인 문제의 결과일 수도 있다. 流動場 解析前에는 처마 접속지역에서 작은 渦流가 발생할 것을 기대하였으나, 유동의 박리현상은 나타나지 않았다. 우선 이는 시설의 지붕곡선이 실제보다 매우 완만하여 風流線이 지붕곡면에 따라 형성되어 유동박리현상을 관찰할 수 없었을 가능성이 있다. 또는 실제 처마접속지역의 수치해석의 측면에서 볼 때, 格子크기가 너무 커 微小領域의 풍속값을 컴퓨터가 기억하지 못했을 가능성도 있다. 그러나 무엇보다도 가장 가능성이 큰 원인은 $k-\epsilon$ 난류모형이 가지고 있는 본질적인 문제 때문인 것 같다.

3. 棟間距離가 있는 2連棟 아치형 시설의 유동장 해석

2棟 아치형 시설의 棟間 거리가 약 3m 정도로 가정하고 곡선좌표계 계산영역을 설정하였다. Fig. 1의 형태와 동일하고 단동대신에 3m거리의 2개의 단동을 적용하였다. Fig. 10의 좌측 風上側 속도형상은 수치해석상 기법도입의 어려움 때문에 계산된 속도를 높이에 따라 단동, 2연동 시설의 주변 풍속장과 같이 離散化하여 적용하였다.

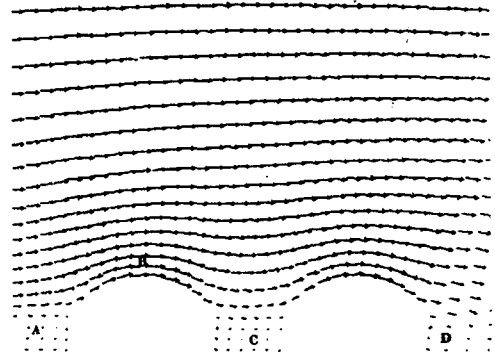


Fig. 10. Calculated flow patterns around two single span greenhouses apart 3m inbetween at the velocity profile on boundary layer flow.

경계층 난류가 風上側에서 발생할 때 높이에 따른 풍속형상은 단동, 연동의 아치형 시설 주변의 유동장과 마찬가지로 등속류 풍속형상인 경우 Fig. 10의 A지역에 standing vortex가 발생하지 않고, 풍속형상이 경계층류인 경우 유동의 剝離현상을 관찰할 수 있다. 이는 기본적으로 단동의 주변 풍속장의 해석과 같이 運動量 轉移의 大小에 따라 직접적인 영향을 받는 것 같다. 棟間거리가 있는 2연동 시설 주변의 압력분포 및 변형텐서의 분포도 棟間空間의 정체지역을 제외하고는 單棟, 2連棟과 거의 같았다. 이러한 유동장의 類似性은 앞에서 분석한 것과 같이 시설의 기하학적 특성에 기인하거나 본 연구에서 적용한 난류모형인 $k-\epsilon$ 모형이 내포하고 있는 본질적인 문제의 결과일 수도 있다.

要約 및 結論

본 연구에서는 單棟, 2連棟, 棟間隔이 있는 2連棟 주변의 유동장을 해석하였고, 日本 및 미국 기준이 제시한 單棟 아치형 시설의 풍력계수를 수치 해석에 의하여 구한 이론 풍력계수와 비교하여 이의 有意性을 檢定하였다. 본 연구의 구체적인 결론은 다음과 같다.

1) 단동 아치형 시설의 경우, 제시한 일본과 미국의 평균 풍력계수의 분포와 이론적인 풍력계수의 분포는 미국기준의 風上지붕의 1/4면을 제외하고는 定性的으로 같았다. 그러나 定量的으로는 風上, 風下壁을 제외하고는 두 기준값의 편차가 심하여 이론값의 유의성검정을 위한 기준값 설정이 불가능하였다.

2) 단동 아치형 시설의 경우, 지붕중앙 1/2면의 절대 풍력계수의 값이 풍상벽의 풍력계수값보다 크기 때문에(미국기준과 이론치를 기준으로 볼 때), 구조적 안정을 위하여 이 부분의 揚力을 風上壁의 抗力 못지않게 고려해야 한다.

3) 風下壁에서의 풍력계수는 이 지역의 유동 자체가 복잡한 재순환유동이므로 벽면에 작용하는 풍력도 시설 벽면에 수직되게 작용하지 않을 때 제3의 橫風力도 존재하므로 이들이 복합적으로 작용할 때는 제3의 合成모멘트가 생성되어 피복면을 파괴시키는 원인이 된다.

4) 單棟, 2連棟 모두 속도형상이 경계층류일 경우 유체가 벽면 가까이에서 증가하는 압력기울기($dP/dx > 0$), 즉, 好壓力기울기에 의한 유동은 박리현상을 관찰할 수 없었다.

5) 單棟 시설 주변의 변형텐서($\partial U_i / \partial x_j$) 및 압력기울기의 분포는 기본적으로 2연동, 동간거리가 있는 2연동의 분포와 거의 같았다. 이는 $k-\epsilon$ 난류 모형이 가지고 있는 본질적인 문제 때문인 것 같다.

6) 경계층 난류가 風上側에서 발생할 때 높이에 따른 풍속형상은 단동, 연동의 아치형 시설 주변의 유동장과 마찬가지로 棟間지역에서 작은 渦流가 발생하였으나 풍속이 거의 0에 가까워 오히려 停滯地域으로 해석해야 할 것 같다.

參 考 文 獻

1. 金文基, 孫禎翼, 南相運. 1992. 生物生産施設의

構造設計에 관한 研究 (1), (2) 生物生産施設環境 1(1), 1(2) : 1-13, 148-153.

2. 孫禎翼. 1994. 農業施設의 設計荷重 算定을 위한 適正 單位積雪量과 瞬間最大風速의 決定 및 適用. 生物生産施設環境 3(1) : 1~9.
3. 李賢雨. 1991. 아치형 하우스의 風力係數 分布에 관한 研究. 慶北大 博士學位論文, 慶北大 大學院.
4. Patankar, S. V. (이재현譯). 1988. 熱傳達 및 流體流動 數值解法. 대한교과서주식회사
5. 崔英惇. 1993. 電算流體 力學의 基礎와 應用. 圖書出版 한미.
6. 農林水産技術會議 事務局. 1981. 高能率園藝施設計劃・設計基準に關する研究結果.
7. Choi, H. L., L. d. Albright, M. B. Timmons, W. Zellman. 1988. An application of the $k-\epsilon$ turbulence model to predict air distribution in a slot-ventilated enclosure. Trans. ASAE 31(6) : 1804-1814.
8. Choi, H. L., H. T. Kim. 1992. An application of $k-\epsilon$ turbulence model to predict how a rectangular obstacle with heat flux affects air flow in an experimental animal house. J. Bio. Fac. Env. (生物生産施設環境) 1(1) : 72-83.
9. Tennekes, H. and J. L. Lumley. 1972. A first course in turbulence. MIT Press, Cambridge, MA.
10. Rodi, W. 1984. Turbulence models and their applications in hydraulics—A state of the art review. (1st ed.). International association for hydraulic research, Delft.
11. Thompson, J. F., Z. U. A. Warsi, and C. W. Mastine. 1985. Numerical grid generation; Foundation and applications. North-Holland, NY.
12. Murakami S. A. Mochida, and Y. Hayashi. 1990. Examining the $k-\epsilon$ models by means of a wind tunnel test and large-eddy simulation of the turbulence structure around a cube. J. Wind engineering and industrial aerodynamics 35:87-100. Elsevier science Publisher.
13. NGMA. 1981. Standards : Design loads in greenhouse structures ventilating and cooling greenhouses, greenhouse heat loss. MI, U. S. A.