

저항물체 배후의 이차원 후류에 관한 대격자 수치모형 A Numerical Model of Large Scale Grid for Two-Dimensional Wake behind Bodies

박일흠* · 이종섭** · 이문옥*

Il Heum Park*, Jong Sup Lee** and Moon Ock Lee*

요 旨 : 대격자망 수치모형에서 저항물체에 의한 유수저항을 평가하기 위하여, 항력으로부터 유도된 drag stress를 수직적분된 Reynolds 방정식에 도입하였다. 그리고, 해석해가 존재하는 조건에 대한 다양한 수치실험을 통하여 본 모형의 적용성 및 문제점을 검토하였다. 단일물체의 경우, 수치해는 해석해에 대하여 유속의 크기에 있어서 $\pm 10\%$ 정도의 오차범위를 나타내는 좋은 일치를 보였으며 후류폭의 크기도 전 경우에 있어서 해석해와 잘 일치 하였다. 또한, 열을 이룬 물체에 대한 항력계수와 와동점성계수가 정확하게 결정된다면, 본 모형은 열을 이룬 물체 배후에서 평균류의 흐름분포를 평가하는 데 효율적으로 이용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 항력, 후류, 수치모형, 대격자망, 시간평균류

Abstract □ To evaluate the hydraulic resistance behind bodies in a large scale grid numerical model, a drag stress term which is formulated by the drag force is introduced in the depth-integrated Reynolds equations. And also, the applicability and problems of this model are discussed through various numerical experiments where the analytical solutions exist. In the case of a single body, the error range of velocity difference between analytical and numerical solutions is within $\pm 10\%$ and the wake width behind the body shows a good agreement with the analytical solution. When the drag coefficient and the eddy viscosity are precisely decided, the numerical solutions behind a row of bodies will be efficiently used in real situations.

Keywords : drag force, wake, numerical model, large scale grid, time averaging flow

1. 서 론

하천, 연안 및 항만에 설치된 교량의 교각, 돌핀 부두의 말뚝, 수산 증·양식시설물 그리고 기타 구조물 등은 유수 중에 잠겨서 흐름 저항을 유발시킨다. 이에 따라 이들 구조물 배후에서는 후류와(wake)가 발생하며, 구조물 주변에서는 급격한 유속 및 수위 변화가 발생하게 된다. 이러한 난류의 엄밀한 수치계산을 위해서는, 흐름의 경계층을 포함하며 아주 미세한 격자구조체계를 갖추어 순간 유속장을 재현할 수 있는 LES (Large Eddy Simulation) 및 DNS(Direct Numerical Simulation)가 사용되고 있다(Arakawa, 1994). 그러나,

LES 및 DNS를 이용하기 위해서는 엄청난 기억용량과 계산시간이 요구되며, 실제 공학적인 문제에서는 순간 유속장에 대한 정보를 필요로 하는 경우가 적고 시간 평균치를 아는 것으로 충분한 경우가 대부분이므로, 이에 대한 적절한 모형의 개발이 요구된다.

Reynolds 방정식을 이용하는 시간평균류 모형에서, 넓은 지역을 대상으로 유동을 재현할 경우 상기의 구조물들은 그 단면적이 계산격자에 비하여 아주 작으므로 이들 구조물을 무시하고 계산을 행하는 것이 일반적이었으며, 계산격자를 아주 세밀히 갖추거나 혹은 가변격자체계를 이용하여 그 구조물의 단면적이 계산격자와 상당한 경우 구조물의 단면형상에 관계없이 유

*여수대학교 해양공학과 (Department of Ocean Engineering, Yosu National University, Yosu 550-749, Korea)

**부경대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea)

지화하여 섬으로 처리하여 유동계산을 행하여 왔다. 그러나, 계산격자가 구조물의 단면적에 비하여 너무 커서 구조물이 무시되는 경우에는 구조물 배후의 유동양상을 전혀 나타낼 수 없으며, 구조물의 형상에 관계없이 마치 섬처럼 취급하는 경우에는 흐름장에 대한 구조물의 영향이 과대평가될 우려가 있다.

따라서, 본 연구에서는 평균류를 이용한 대격자망 하에서 이러한 문제를 해결하기 위하여, 수하식 양식 시설의 우수저항에 적용한 바 있는 이·박(1995)의 모형을 기초로 저항물체의 형상을 고려한 항력을 평균류에 관한 흐름의 운동방정식에 도입하였다. 그리고, 해석해가 존재하는 조건에 대하여, Reynolds 수, 격자간격, 물체의 형상에 따른 다양한 수치실험을 통하여 본 모형의 적용성을 검토하였으며, 또한 여러 개의 저항물체가 열을 이룬 경우에 대한 검증도 행하여 이에 따른 문제점에 관하여 논의하였다.

2. 저항물체 배후의 후류에 관한 해석해

2.1 단일물체 배후에서의 후류

이차원 후류에 관한 최초의 연구는 Prandtl의 혼합거리이론에 기초한 Schlichting(1930)에 의하여 이루어졌으며, 와동점성계수를 도입한 Prandtl의 가설에 기초한 동일한 문제에 관한 해는 Reichardt(1951)와 Görtler(1942)에 의하여 주어졌다(Schlichting, 1979).

식 (1)과 같은 Prandtl의 혼합거리이론을 이용한 Schlichting(1930)에 의한 해는 식 (2)와 같다.

$$\tau_i = \rho l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

여기서, τ_i 는 난류전단응력, ρ 는 유체의 밀도, u 는 유하 방향의 유속, 그리고 l 은 혼합거리이다.

$$\frac{u_D}{U} = \frac{\sqrt{10}}{18\beta} \left(\frac{x}{C_D D} \right)^{-1/2} \left\{ 1 - \left(\frac{y}{B} \right)^{3/2} \right\}, \quad \frac{x}{C_D D} > 50 \quad (2)$$

여기서, u_D 는 후류의 결손유속(velocity difference, $u_D = U - u$), U 는 자유유속(free stream velocity), x 는 유하방향의 거리, y 는 횡방향의 거리, C_D 는 물체의 항력계수, D 는 물체의 직경, β 는 혼합거리와 후류폭과의 비를 나타내는 상수로서 0.18의 값을 가진다. 그리고, 후류폭 B 는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$B = \sqrt{10} \beta \left(x C_D D \right)^{1/2} \quad (3)$$

한편, 식 (4)와 같이 와동점성계수를 이용한 Prandtl의 가설로부터 유도된 Reichardt(1951)와 Görtler(1942)의 해는 식 (5)와 같다.

$$\tau_i = \rho \varepsilon_i \frac{\partial u}{\partial y} = \rho \kappa_1 B (u_{\max} - u_{\min}) \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4)$$

여기서, ε_i 는 와동점성계수, κ_1 은 경험적 상수이다.

$$\frac{u_D}{U} = \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{U C_D D}{\varepsilon_0}} \left(\frac{x}{C_D D} \right)^{-1/2} \exp \left(-\frac{1}{4} y \sqrt{\frac{U}{\varepsilon_0 x}} \right) \quad (5)$$

식 (4)에서 ε_i 는 해를 얻기 위하여 상수로 취급하여 ε_0 로 주었으며, 실험치에 의한 후류폭과 식 (5)에 의한 조건으로 결정되는 ε_0 는 식 (6)과 같다.

$$\varepsilon_0 = 0.0222 C_D D U \quad (6)$$

이러한 해석해에 관한 식 (2) 및 (5)는 Fig. 1과 같이 Schlichting(1930)의 원형 실린더에 관한 실험치와 비교가 이루어졌으며, 해석해와 실험치는 잘 일치하는 결과를 보인다. 그림에서 실선은 식 (2), 점선은 정규분포하는 식 (5)를 나타낸다.

한편, 본 저자들은 식 (2)와 (5)에 의한 후류폭 B 를 계산하면서 다소의 상이함을 발견하였는데, 이것은 Reichardt(1951)와 Görtler(1942)가 식 (6)의 상수를 결정할 때 절단오차를 무시한 것에 기인되었던 것으로 판단된다. 따라서, 식 (6)의 상수 0.0222는 0.02254211(≈ 0.0225)가 정확한 값이며, 또한 식 (7)의 후류에 관한 반치반폭(the value of half the width at half the depth) $B_{1/2}$

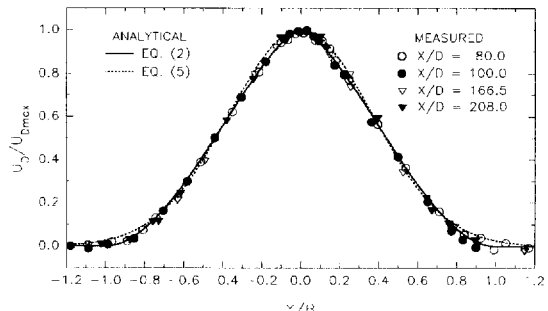


Fig. 1. Relative velocity difference distribution in a two-dimensional wake behind a circular cylinder. Comparison between theory and measurement after Schlichting (1930).

에서 상수 1.675는 1.665109222(≈ 1.665)가 정확한 값을 밝혀준다. 그러나, 후류폭 자체가 실험치로서 결정되었고, 이러한 상수가 후류의 산정에 있어서 큰 영향을 미치지 않으므로 이하의 본 연구에서는 Reichardt(1951)와 Görtler(1942)가 제안하는 값을 그대로 사용한다.

$$B_{1/2} = 1.675 \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{UC_D D}} (xC_D D)^{1/2} \quad (7)$$

2.2 열을 이룬 물체 배후에서의 후류

열을 이룬 저항물체 배후에서의 후류에 관한 이론적·실험적 연구는 Gran Olsson(1936)에 의하여 이루어졌다. 그는 충분히 발달된 흐름의 경우 속도분포를 y 에 관한 주기함수로 가정하였으며, 그 주기를 저항물체 사이의 거리(pitch) λ 로 두었다. 그리고 난류전단응력 τ_x 는 Prandtl의 혼합거리이론을 확장한 식 (8)을 사용하였으며, 식 (8)에서 $l = \text{const.}$, $l_1 = \lambda/2\pi$ 로 두어 매우 간단한 형태의 해를 식 (9)와 같이 유도하였다(Schlichting, 1979).

$$\tau_x = \rho l^2 \frac{\partial u}{\partial y} \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + l_1^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)^2} \quad (8)$$

$$\frac{u_D}{U} = \frac{1}{8\pi^3} \left(\frac{\lambda}{l}\right)^2 \frac{\lambda}{x} \cos\left(2\pi \frac{y}{\lambda}\right), \quad \frac{x}{\lambda} > 4 \quad (9)$$

그리고, 그는 원형 기둥의 열 배후 $\lambda/x=8$ 에서 혼합거리의 식 (10)과 같이 주었다.

$$\frac{l}{\lambda} = 0.103 \quad (10)$$

한편, Görtler(1942)는 식 (4)와 같은 조건으로 동일한 문제를 푼 결과, 식 (9)와 유사한 형태의 해를 식 (11)과 같이 유도하였다(Schlichting, 1979).

$$\frac{u_D}{U} = \frac{1}{8\pi^2 K} \frac{\lambda}{x} \cos\left(2\pi \frac{y}{\lambda}\right) \quad (11)$$

여기서, K 는 혼합거리를 식 (10)과 같이 가정한 경우 0.0333으로 주어진다.

3. 항력을 고려한 평균류의 운동방정식

어떤 물체가 유체 속을 움직이는 경우 혹은 유수 중에 어떤 물체가 놓여져 있는 경우 이 물체와 유체사이

에는 어떤 상호작용이 발생하며, 이러한 효과는 유체와 물체의 경계면에서 힘과 관련된 항으로 나타낼 수 있다. 이 힘은 점성효과에 의한 벽면전단응력(wall shear stress) τ_w 와 압력 p 에 의한 법선응력(normal stress)의 항으로 기술될 수 있다. 그러나, 이러한 전단응력과 압력의 분포는 이론적·실험적으로 얻기가 매우 어려우므로 일반적으로 항력계수 C_D 를 도입하여 식 (12)와 같이 유속에 관한 이차식으로 나타낸다(Munson *et al.*, 1994).

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A_D \vec{U}_a |\vec{U}_a| \quad (12)$$

여기서, A_D 는 물체의 흐름방향에 대한 투영면적 그리고 \vec{U}_a 는 접근유속(approach velocity) 벡터이다. 항력을 평가하기 위해서는 C_D 의 결정이 중요하며, C_D 는 주로 물체의 형상과 Reynolds 수 Re 에 의존한다. 그리고, 물체가 유수 중에 여러 개 존재할 경우, 항력은 식 (13)과 같이 단위면적당 항력 즉, 응력의 차원으로 나타낼 수 있다.

$$\tau_D = \frac{n}{2} \rho C_D A_D \vec{U}_a |\vec{U}_a| \quad (13)$$

여기서, n 은 단위면적당 저항물체의 개수이다.

Boussinesq 근사를 행한 Reynolds 방정식과 연속방정식을 연직방향으로 Leibnitz 부분적분하면, 다음과 같은 수심적분된 유체의 운동방정식과 연속방정식을 얻을 수 있다(Falconer, 1994).

$$\begin{aligned} \frac{\partial UH}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta U^2 H) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta UVH) - fVH + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ - \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \tau_x dz - \varepsilon H \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial VH}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta UVH) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta V^2 H) + fUH + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ - \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \tau_y dz - \varepsilon H \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

여기서, t 는 시간, β 는 운동량 보정계수, U, V 는 x, y 방향의 수심평균유속, $H(=h+\eta)$ 는 전수심, g 는 중력가속도, f 는 Coriolis parameter, η 는 해면변위, h 는 수심, τ_x, τ_y 는 x, y 방향의 전단응력 그리고 ε 은 수심평균된 와동점성계수이다.

식 (14), (15)의 전단응력항에 바람 및 저면에 의한

마찰을 고려하고, 식 (13)과 같은 단위면적당 항력을 도입하면 다음의 식 (17), (18)과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial UH}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta U^2 H) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta UVH) - fVH + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & - \frac{\gamma \rho_a W_x W_s}{\rho} + \frac{gU\sqrt{U^2+V^2}}{C^2} + \frac{nC_{Dx}A_{Dx}U_a\sqrt{U_a^2+V_a^2}}{2} \\ & - \varepsilon H \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial VH}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta UVH) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta V^2 H) + fUH + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ & - \frac{\gamma \rho_a W_y W_s}{\rho} + \frac{gV\sqrt{U^2+V^2}}{C^2} + \frac{nC_{Dy}A_{Dy}V_a\sqrt{U_a^2+V_a^2}}{2} \\ & - \varepsilon H \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, ρ_a 는 대기의 밀도, γ 는 해면에서 바람에 의한 마찰저항계수, W_x , W_y 는 x , y 방향의 풍속, W_s 는 풍속, C 는 Chezy 계수, C_{Dx} , C_{Dy} 는 x , y 방향의 항력계수, A_{Dx} , A_{Dy} 는 x , y 방향의 물체의 투영면적 그리고 U_a , V_a 는 x , y 방향의 접근유속이다.

상기의 식 (17), (18)에서 좌변의 여덟 번째 항은 유수 중에 놓여진 물체에 의한 항력을 고려한 항으로서 특히, n 값은 실제 계산격자체계에서 식 (19)와 같이 표현되며, U_a 및 V_a 는 물체의 상류측 한 격자 앞의 값을 사용한다.

$$n_{i,j} = \frac{m_{i,j}}{\Delta x \Delta y} \quad (19)$$

여기서, $m_{i,j}$ 는 그 격자 내의 저항물체 개수 그리고 Δx , Δy 는 x , y 방향의 계산격자간격이다. 따라서, 식 (17), (18)은 식 (16)과 더불어 저항물체에 의한 유수저항을 고려한 평균류에 관한 기본방정식이 되며, 수치모형을 구성하여 수치해를 구할 수 있다. 수치계산방법은 ADI(Alternating Direction Implicit) 법을 사용하였으며, 공간적으로 엇갈린 격자체계(staggered grid scheme)를 사용하였다.

4. 수치모형의 검증 및 토의

유수 중에 잠긴 저항물체의 영향을 고려한 평균류의 유동구조를 파악하기 위하여 Fig. 2와 같은 모형수조

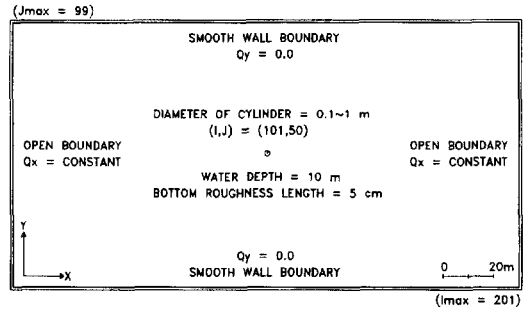


Fig. 2. Definition sketch of model basin.

를 구성하였다. 그림에서와 같이 수심은 전 수조를 통하여 10 m, 저면마찰에 관한 조도높이는 5 cm로 일정하게 두었으며, 수조의 좌우측은 유속제어의 개경계로, 수조의 상하측은 벽면마찰이 없는 매끄러운 벽면 경계(smooth wall boundary)로 처리하였다.

그리고 흐름은 좌측에서 우측방향으로 일정한 유량이 흐르도록 하였다.

4.1 저항물체를 섬으로 가정한 경우의 문제점

계산영역 내에서 어떤 저항물체가 존재할 경우, 이 물체의 평면적 크기가 계산격자간격에 비하여 아주 작으면 일반적으로 이 물체를 무시하고 유동계산을 하게 되며, 계산격자간격이 이 물체와 상응하는 크기를 가지면 일반적으로 이 물체는 육지화하여 섬으로 취급하여 수치계산을 하게 된다. 그러나, 이 저항물체를 섬으로 취급하는 경우, 물체의 표면은 대개 매끈하므로 조도는 일반적으로 하천 혹은 연안에서의 저면조도와 달라 마찰항이 과대평가되는 경향이 있으며, 더 큰 문제로서 이러한 물체가 국지역에 다수 존재하게 되면, 그 국지전역을 육지화하여 실제 흐름이 있는 영역을 흐름의 소동이 전혀 없는 것으로 재현할 수 밖에 없게 된다. 또한, 이 물체의 평면형상이 일반적으로 계산격자처럼 사각형을 가지는 예가 드물어 이 물체의 형상을 정확히 고려할 수 없다. 하천, 연안 혹은 항만 등에서 교량의 교각, 돌핀부두 혹은 양식시설의 말뚝 등과 같이 이들 물체가 존재하는 경우, 지금까지 시도되어온 수많은 대격자망에서의 수치실험에서는 이들의 영향을 적절하게 평가하지 못하였다.

이에 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 모형수조의 중앙 지점에 직경 1 m의 매끈한 실린더를 설치하고 계산격자간격이 이 실린더 직경과 일치하도록 구성하여 이 구조물을 한 개의 섬으로 취급될 수 있도록 하였다. 이

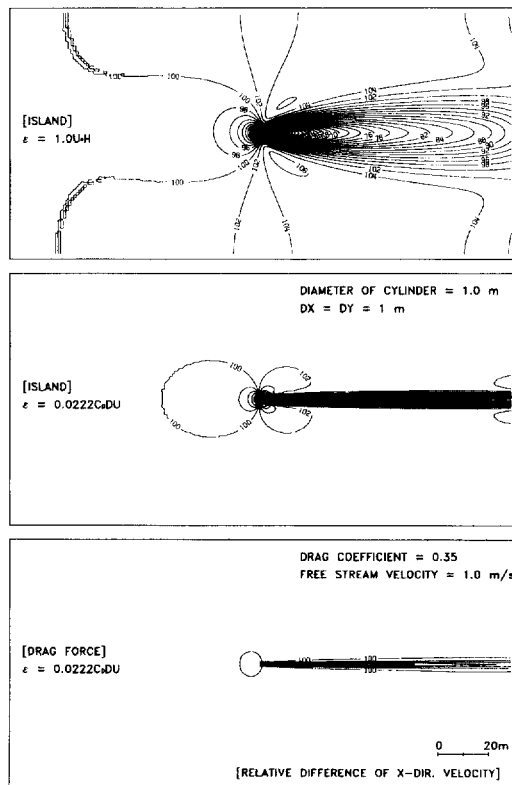
Table 1. Numerical calculation conditions for island cases.

Run	Handling	Eddy Viscosity	Free Stream Velocity	Remarks
RUN-11	Island	$\epsilon=1.0U_\tau H$		$D=1.0$ m
RUN-12	Island	$\epsilon=0.0222C_D DU$	$U=1.0$ m/s	$\Delta x=\Delta y=1$ m
RUN-13	Drag Force	$\epsilon=0.0222C_D DU$		$C_D=0.35$

U_τ =friction velocity

에 따라 계산된 결과를 전술한 해석해와 비교하여 상기의 문제점을 평가하고자 한다. 이에 대한 수치실험 조건을 요약하면 Table 1과 같다.

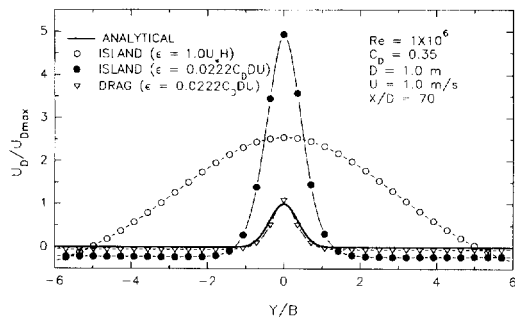
Fig. 3은 Table 1의 조건에 따라 계산된 x 방향 유속의 자유유속에 대한 상대비를 백분율로 나타낸 것이다. 맨 위의 그림은 와동점성계수를 일반적인 개수로에서 사용하는 값을 이용한 것으로 섬으로 취급한 실린더 주변에서 급격한 유속변화가 나타나고 있으며, 실린더 배후의 후류폭도 아주 크게 나타나고 있다. 이러한 점을 감안하여 와동점성계수를 해석해로 구한 식(6)으로 주었을 경우의 가운데 그림은 와동점성계수가

**Fig. 3.** Distribution of x -dir. velocity in cases of RUN-11 to RUN-13.

아주 작아져서 후류폭이 많이 감소하고 있으나 y 방향의 유속경사가 아주 크게 나타나고 있다. 한편, 맨 아래 그림은 본 연구에서 제안하는 항력을 고려한 평균류의 운동방정식으로 구한 수치해로서 이것은 상기의 두 가지 그림과 비교하여 유속의 변화폭이 크게 줄어들고 있으며, 실린더 배후의 후류폭도 두 가지 그림에 비하여 그리 크지 않음을 알 수 있다.

이러한 유속의 크기 및 후류폭에 관하여 자세히 알아보기 위하여, 실린더 배후의 $x/D=70$ 의 거리에서 결손유속 및 후류폭을 해석해와 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서와 같이 원형 실린더를 섬으로 취급한 경우 와동점성계수의 선택에 따라 후류폭의 크기를 조절할 수 있지만 어떠한 경우에도 유속의 크기를 해석해 수준으로 맞추기는 어렵다. 그림에서 u_D/u_{Dmax} 의 최대값은 해석해에 비하여 RUN-11의 경우 +255%, RUN-12의 경우 +493%까지 과대평가되었으며, 후류폭의 경우 RUN-11은 +509%, RUN-12는 +129% 정도로 나타났다. 그러나, 항력을 고려한 경우의 수치계산(RUN-13)에서 결손유속 및 후류폭의 크기는 해석해와 아주 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 실린더와 같은 구조물을 섬처럼 가정하여 흐름분포를 계산하는 것은 어떠한 경우에도 유속변화를 과대평가하게 됨을 알 수 있다.

한편, RUN-13과 같이 항력을 고려한 경우, 이 물체

**Fig. 4.** Relative velocity difference and wake width in cases of RUN-11 to RUN-13.

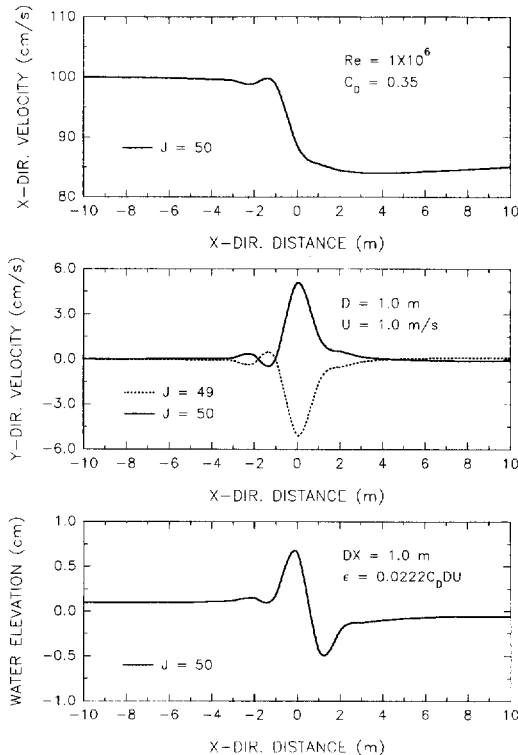


Fig. 5. Variations of x-dir., y-dir. velocity and water elevation through the center line of basin in case of RUN-13.

주변에서 나타나는 흐름 구조를 수조의 중심선($j=50$)을 따라 유하방향으로 자세히 나타낸 것은 Fig. 5와 같다. x 방향 유속의 경우 실린더 전면의 세 격자 앞에서부터 다소의 변화가 나타나며 두 격자 앞에서 자유 유속에 비하여 최대 2.0%의 유속증가율을 나타낸다. 실린더 배후에서는 x 방향의 유속이 크게 작아져 최대 15.9%의 유속감소율을 보이며, 이러한 유속감소의 경향은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 거의 수조의 끝까지 나타난다. 그리고, y 방향 유속의 경우 그 영향범위는 실린더 상류측의 세 격자 정도 그리고 하류측에서는 네 격자까지 영향을 미치며, 유속의 증감율은 자유유

속에 대하여 $\pm 5.1\%$ 정도이다. 그림에서 $j=49$ 및 $j=50$ 의 2 line에 대하여 나타낸 것은 본 수치모형이 엇갈린 격자를 이용하므로 수치실험결과가 대칭성을 잘 나타내고 있는지를 검증한 것이다. 또한, 실린더 상류측에서는 수위가 대체적으로 상승하고 하류측에서는 전반적으로 수위가 하강하는 특성을 보이며, 특히 실린더 상류측 두 격자 앞에서 수위가 갑자기 증가하며, 하류측 두 격자 내에서 수위가 급격히 하강하는 경향을 나타낸다. 구조물이 없는 자유유속 상태를 감안하면 이 부근의 수위가 대칭적인 수조구조에 따라 0 cm가 되므로 최대수위 증가량은 +0.66 cm, 최대수위 하강량은 -0.43 cm이다. 이상과 같이 계산격자간격에 따라 유수 중의 저항물체를 육지화하여 점으로 취급하거나 아예 무시하는 경우 물체 주변의 유동상황을 적절하게 재현할 수 없음을 알 수 있다.

4.2 Reynolds 수에 따른 검증

4.1 절에서 토의한 바와 같이 본 수치모형은 유수 중 저항물체에 의한 후류의 유속 크기 및 후류폭을 잘 나타내었다. 그러나, 그 결과가 어느 특정한 조건에서만 잘 나타났는지 기타 다른 조건에서도 후류를 잘 나타낼 수 있는지에 대한 검증은 이루어지지 않았다. 따라서, 본 절에서는 자유유속의 크기와 저항물체의 직경을 바꾸어 가면서 즉, 다양한 Reynolds 수에서의 검증을 행하였다. 사용된 모형수조는 4.1 절에서 토의한 Fig. 2의 조건과 동일하며, 기타 수치실험조건을 정리한 것은 Table 2와 같다.

Fig. 6은 Table 2의 조건으로 계산된 결과를 나타낸다. 사용된 Reynolds 수의 범위는 $1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^4$ 에 대한 다섯 가지 경우이며, 실린더 배후의 거리에 따른 수치해의 검증을 위하여 $x = 70, 80, 90$ m의 세 단면에 대한 결과를 종합적으로 나타내었다. 그림에서처럼 최대결손유속이 나타나는 $y/B = 0$ 에서 오차는 $x = 70$ m의 경우 6.4~9.6%, $x = 80$ m의 경우 5.0~6.8% 그리고 $x = 90$ m의

Table 2. Numerical calculation conditions for various Reynolds number.

Run	Reynolds Number	Drag Coefficient*	Free Stream Velocity	Remarks
RUN-21	$Re = 1 \times 10^6$	$C_D = 0.35$	$U = 1.0$ m/s	
RUN-22	$Re = 5 \times 10^5$	$C_D = 0.60$	$U = 0.5$ m/s	$D = 0.1 \sim 1.0$ m
RUN-23	$Re = 1 \times 10^5$	$C_D = 1.25$	$U = 0.1$ m/s	$\epsilon = 0.0222C_D DU$
RUN-24	$Re = 5 \times 10^4$	$C_D = 1.25$	$U = 0.1$ m/s	$\Delta x = \Delta y = 1$ m
RUN-25	$Re = 1 \times 10^4$	$C_D = 1.05$	$U = 0.1$ m/s	

*see Idelchik (1960)

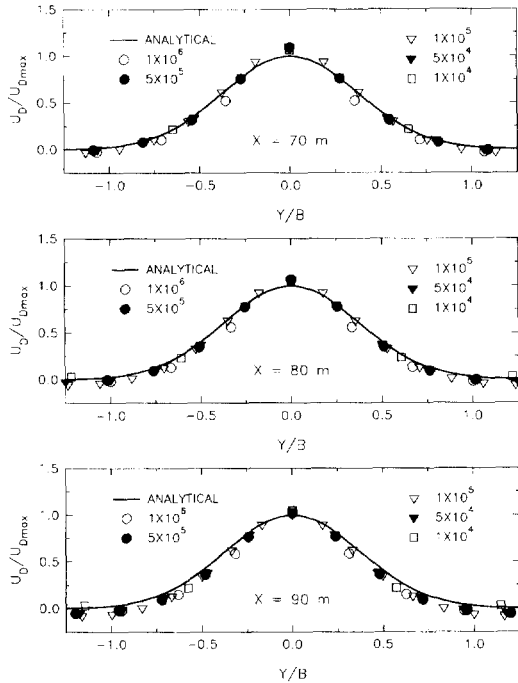


Fig. 6. Relative velocity difference and wake width in cases of RUN-21 to RUN-25.

경우 0.4~5.26% 정도로 아주 양호하며, 후류폭도 대체적으로 모든 경우에 있어서 잘 일치하나 우측의 개경계에 가까이 갈수록 해석해에 비하여 그 폭이 작아지는 경향을 보인다.

한편, 경계치 문제로 주어진 본 수치실험에서 상기의 Fig. 6 및 앞으로 토의될 Fig. 8, 9의 $x=90\text{ m}$ 혹은 $x/D=90$ (저항물체에서 우측 개경계까지 10 격자 떨어진 경우)에서의 결과와 같이 우측 개경계로 갈수록 후류폭의 크기가 해석해에 비하여 작아진다. 이것은 모형수조 좌·우의 개경계에서 같은 유량이 통과하도록 한 우측 개경계의 영향이 과급된 것으로, Fig. 7과 같이 저항물체에서 개경계 사이의 거리가 멀어지면, 기대되었던 바와 같이, 후류폭의 크기는 해석해와 잘 일치한다. 단, 계산조건으로 저항물체의 위치는 모든 경우에 있어서 $(i, j)=(101, 50)$ 으로 고정시켰으며, 수조의 길이를 최초 모형수조보다 50, 100 m 만큼 늘려, 저항물체에서 우측 개경계까지 각각 10, 60, 110 격자만큼 떨어져 있게 하였다.

4.3 계산격자의 크기 변화에 따른 검증

4.2 절에서는 계산격자간격을 저항물체의 직경과 동

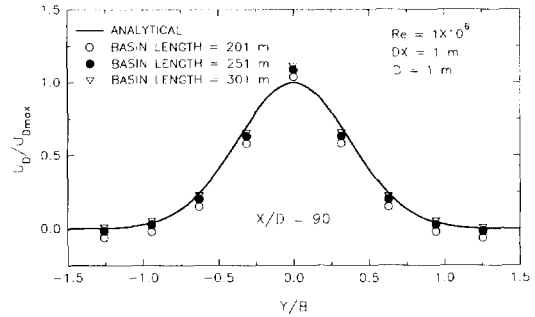


Fig. 7. Variations of numerical solutions according to the distance between a resistance body and the right-hand side open boundary.

일하게 두고 다양한 Reynolds 수에 따른 본 모형의 적용성을 검토하였다. 그러나, 실제 평균류에 대한 흐름을 계산할 경우 상당히 넓은 영역을 대상으로 하며 계산시간을 절약하기 위하여 계산격자간격도 이에 준하여 설정하게 된다. 이러한 경우 대부분의 저항물체의 단면적은 계산격자의 단면적에 비하여 아주 작게 되므로 이 물체를 무시하고 수치계산하게 된다. 그러나, 4.1 절에서 토의한 바와 같이 이 물체에 의한 영향은 무시할 만한 정도가 되지 않는다. 따라서, 본 절에서는 저항물체의 단면적 및 형상을 고정하고 계산격자간격을 바꾸어 가면서 본 모형의 적용성에 대한 검증을 행하였다. 수치실험조건은 Table 3과 같다.

Fig. 8은 Table 3의 조건으로 계산된 결과를 나타낸다. 사용된 격자간격은 실린더 직경에 대한 등배, 두 배, 세 배의 세 가지 경우이며, 실린더 배후의 거리에 따른 수치해의 검증을 위하여 $x/D=70, 80, 90$ 의 세 단면에 대한 결과를 함께 나타내었다. 그림에서처럼 최대결손유속이 나타나는 $y/B=0$ 에서 오차는 $x/D=70$ 의 경우 $-9.9\sim+11.1\%$, $x/D=80$ 의 경우 $-7.3\sim+12.0\%$ 그리고 $x/D=90$ 의 경우 $-4.5\sim+12.3\%$ 정도로 나타났으며, $\Delta x/D=1$ 인 경우 최대결손유속의 오차가 가장 작게 나타나고 $\Delta x/D=2$ 인 경우 $+10.0\%$ 정도의 오차를 나타내고 $\Delta x/D=3$ 인 경우 최대결손유속이 $-9.9\sim-4.5\%$ 범위로

Table 3. Numerical calculation conditions for various grid space.

Run	Grid Space	Diameter	Remarks
RUN-31	$\Delta x=\Delta y=1\text{ m}$		$Re=1 \times 10^6$
RUN-32	$\Delta x=\Delta y=2\text{ m}$	$D=1.0\text{ m}$	$U=1.0\text{ m/s}$
RUN-33	$\Delta x=\Delta y=3\text{ m}$		$\epsilon=0.0222C_D DU$

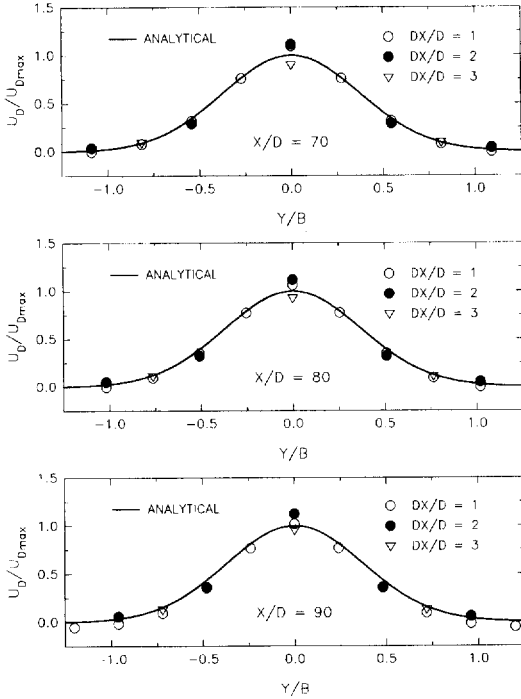


Fig. 8. Relative velocity difference and wake width in cases of RUN-31 to RUN-33.

해석해보다 작게 평가되는 경향을 나타내었다. 그리고 후류폭의 경우 격자간격이 커지면 그 값을 정확하게 판단할 수는 없으나 계산된 결과를 볼 때 해석해와 대체적으로 잘 일치하는 것으로 보인다.

4.4 물체의 형상에 따른 검증

하천, 연안 및 항만 등에 존재하는 저항물체의 형상은 그 구조물의 기능에 따라 평면적인 단면형상이 다양하다. 하천에 설치된 교각의 경우 흐름 방향으로 유수저항을 줄이기 위하여 둥근 모서리를 가지는 타원형상으로 설계하며, 연안에서는 일정한 흐름 방향을 결정하기가 어려우므로 설치되는 교각은 원형 혹은 정사각형 단면으로 설계하며, 항만에서 돌핀부두의 말뚝은

일반적으로 원형 단면으로 결정한다. 따라서, 본 절에서는 여러 가지 저항물체의 형상에 따른 후류의 크기와 후류폭에 대한 검증을 행하여 본 모형의 적용성을 검토하였다. 수치실험 조건은 Table 4와 같다. 한편, Table 4에서 Reynolds 수를 1×10^5 값으로 사용한 것은 타원형이나 정사각형 단면에 대한 항력계수가 기존의 자료 (Idelchik, 1960)를 통하여 알려진 범위에 따른 것이다.

Fig. 9는 Table 4의 조건으로 계산된 결과를 나타낸다. 사용된 물체의 단면형상은 원형, 타원형 및 정사각형 단면의 세 가지이며, Fig. 6, 8과 같이 물체 배후의 거리에 따른 결과도 함께 나타내었다. 그림에서처럼 최대결손유속이 나타나는 $y/B=0$ 에서 오차는 $x/D=70$ 의 경우 $+3.1 \sim +8.3\%$, $x/D=80$ 의 경우 $+0.0 \sim +5.6\%$ 그리고

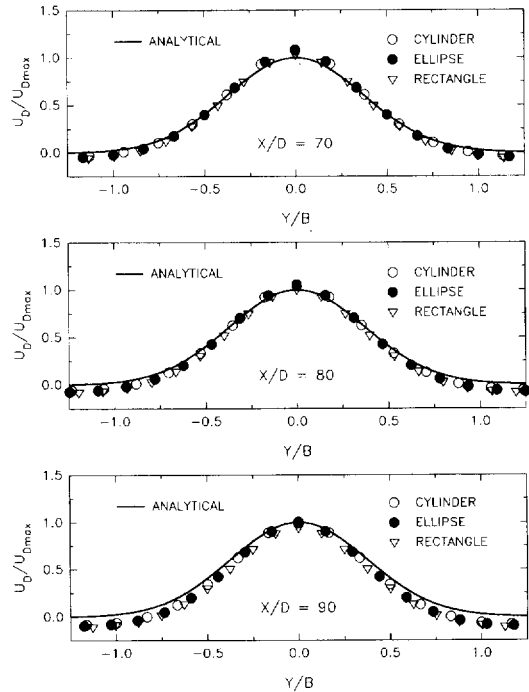


Fig. 9. Relative velocity difference and wake width in cases of RUN-41 to RUN-43.

Table 4. Numerical calculation conditions for various shape of body.

Run	Shape	Drag Coefficient	Diameter	Remarks
RUN-41	Cylinder	$C_D=1.25$	$D=1$ m	$Re=1 \times 10^5$
RUN-42	Ellipse	$C_D=1.60$	$D^*=1$ m & $L^{**}=2$ m	$U=0.1$ m/s
RUN-43	Rectangle	$C_D=2.20$	$D=L=1$ m	$\epsilon=0.0222C_DDU$ $\Delta x=\Delta y=1$ m

*D=minor axis of ellipse

**L=major axis of ellipse

Table 5. Numerical calculation conditions for a row of bodies.

Run	Reynolds Number	Free Stream Velocity	Drag Coefficient	Remarks
RUN-51	$Re=1 \times 10^6$	$U=1.0$ m/s	$C_D^*=0.35$	$D=1$ m
RUN-52	$Re=5 \times 10^5$	$U=0.5$ m/s	$C_D^*=0.60$	$\lambda/D=8$
RUN-53	$Re=1 \times 10^5$	$U=0.1$ m/s	$C_D^*=1.25$	$\epsilon^*=0.0222C_D DU$ $\Delta x=\Delta y=1$ m

* C_D and ϵ are assumed as the values of a single body resistance.

$x/D = 90$ 의 경우 $-6.1 \sim +0.4\%$ 정도로 나타났으며, 후류 폭도 대체적으로 모든 경우에 있어서 잘 일치하나 4.2 절에서와 같이 검증단면에 대한 거리가 우측 개경계에 가까울수록 그 폭이 작아지는 경향을 보인다.

4.5 열을 이룬 물체들에 대한 검증

4.1~4.4 절에서는 단일물체에 의한 후류의 크기와 후류폭에 대한 검증을 행하였다. 그러나, 하천, 연안 및 항만 등에 설치되는 저항물체는 교량의 교각처럼 대개 여러 개가 설치되는 것이 일반적이다. 따라서, 본 연구에서는 해석해가 존재하는 조건의 열을 이룬 물체 배후에서 후류의 양상을 검증하고자 한다. 수치실험 조건은 Table 5와 같다.

Fig. 10은 Table 5의 조건으로 계산된 결과이다. 사용된 Reynolds 수는 $1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^5$ 의 범위에 대한 세 가지이며, 저항물체들의 배후거리에 따른 결과도 함께 나타내었다. 그림에서처럼 최대결손유속이 나타나는 $y/\lambda = \dots -2, -1, 0, 1, 2, \dots$ 에서 해석해에 대한 오차는 $Re=1 \times 10^6$ 의 경우 $+51 \sim +55\%$, $Re=5 \times 10^5$ 의 경우 $+70\%$, 그리고 $Re=1 \times 10^5$ 의 경우 $+60 \sim +68\%$ 정도로 나타났으며, 최저결손유속이 나타나는 $y/\lambda = \dots, -2.5, -1.5, -0.5, 0.5, 1.5, 2.5, \dots$ 에서 오차는 $Re=1 \times 10^6$ 의 경우 $-40 \sim -26\%$, $Re=5 \times 10^5$ 의 경우 $-12 \sim +5.6\%$, 그리고 $Re=1 \times 10^5$ 의 경우 $+8 \sim +15\%$ 정도로 나타났다. 후류폭의 경우 해석해에서 지정한 바와 같이 저항물체의 간격(λ)에 의존하므로, 후류폭은 모든 경우에 있어서 해석해와 잘 일치하는 경향을 보인다.

단일물체에 대한 계산결과에 비하여 열을 이룬 물체 배후에서 결손유속에 대한 수치해는 해석해와 많은 오차를 보인다. 이것은 다음과 같은 이유에 기인되는 것으로 판단된다.

첫째, Table 5에서 지적하였다시피 열을 이룬 물체에 대한 적절한 항력계수의 평가가 어려운 것에 있다. 이러한 항력계수는 항력과 선형적인 비례관계에 있으며

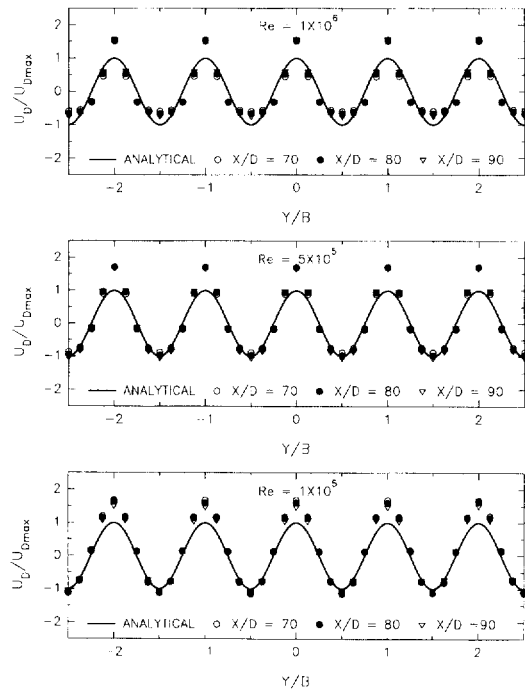


Fig. 10. Relative velocity difference and wake width behind a row of bodies in cases of RUN-51 to RUN-53.

와동점성계수의 산정에 있어서도 선형적인 비례관계에 있으므로, 항력계수는 수치해에서 미치는 영향이 아주 크다고 하겠다. 따라서, 정확한 수치해를 얻기 위해서는 항력계수를 정확하게 평가하는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 열을 이룬 물체의 경우, 형상과 단면적이 단일물체와 동일하다 할지라도 항력계수가 다소 작아지는 경향이 있으므로 열을 이룬 물체에 대한 적절한 항력계수의 평가가 이루어진다면 해석해에 대한 최대결손유속의 오차범위를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

둘째, 본 수치모형은 와동점성계수를 상수로 취급하였으나, 2.2 절의 해석해에서 토의된 바와 같이, 혼합 거리는 식 (10)과 같이 어떤 특정한 곳에서만 결정되어 있으며, 이러한 혼합거리가 전 계산영역에서 받아

들어질 만하다고 가정하여 식 (11)과 같은 Görtler (1942)의 해를 이용하고자 하여도 와동점성계수는 상수가 되지 않고, 본 저자들이 유도한 식 (20)의 형태와 같이, x 에 대한 함수형태인 변수로 주어지게 된다. 그러나, 본 수치모형에서는 와동점성계수를 식 (6)과 같은 단일물체에 의한 것으로 간주하여 수치계산하였다. 이에 따라, 다소의 오차가 포함된 것으로 판단된다.

$$\varepsilon_t = K \lambda (u_{\max} - u_{\min}) = \frac{U \lambda^2}{4\pi^2 x} \quad (20)$$

셋째, 열을 이룬 물체 배후에서의 해석해가 저항물체의 항력계수 및 물체의 직경과 같은 특성을 고려하지 못한 간단한 형태로 주어져 있으며, 여러 물체에 의한 흐름의 비선형적 상호작용을 고려하지 못하고 단순한 주기함수가 될 것이라는 가정에서 출발한 형태이므로, 이 해석해가 실제적인 현상을 잘 표현할 수 있는 것인가 하는 것에도 의문의 여지가 있다.

따라서, 열을 이룬 물체에 대한 항력계수가 정확하게 평가되고 어떠한 형태로든 와동점성계수가 정확하게 평가된다면, 본 수치모형에 의한 해는 열을 이룬 물체 배후에서의 흐름분포를 정확하게 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

평균류를 이용하는 대격자망 조건에서 저항물체에 의한 유수저항을 평가하기 위하여, 저항물체의 형상을 고려한 항력을 Reynolds 방정식에 도입하였다. 그리고, 해석해가 존재하는 조건에 대한 다양한 수치실험을 통하여 본 모형의 적용성을 검토하고 여타의 문제점에 관하여 논의하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 계산격자간격의 크기에 따라, 유수저항을 유발시키는 물체를 무시하면 이 물체에 의한 영향을 고려할 수 없으며, 육지화한 섬처럼 가정하여 흐름 분포를 계산하면 물체 배후의 유속 크기 및 후류폭의 계산치는 어떠한 경우에도 과대평가되므로, 본 모형의 유용성을 입증할 수 있었다.

(2) 단일물체에 있어서 자유유속의 크기 변화에 초점을 맞춘 Reynolds 수에 따른 수치실험, 대격자망에서의 적용성 검토를 위한 계산격자의 크기 변화에 초점을 맞춘 수치실험, 그리고 다양한 형상의 저항물체에 초점을 맞춘 수치실험 등의 결과에 의하면, 수치해는 해석해에

대하여 유속의 크기에 있어서 $\pm 10\%$ 정도의 오차범위를 나타내는 좋은 일치를 보였으며 후류폭의 크기도 전 경우에 있어서 해석해와 잘 일치하였다.

(3) 단일물체에 대한 계산결과에 비하여 열을 이룬 물체에 관한 계산결과는 많은 오차를 보였다. 이것은 열을 이룬 물체에 대한 항력계수 및 와동점성계수의 적절한 평가가 어려운 것과 해석해를 유도하는 데 있어서 저항물체의 특성과 여러 가지 가정에 의한 해석해의 간략화에 기인된 것으로 판단된다. 따라서, 열을 이룬 물체에 대한 항력계수가 정확하게 결정되고 어떠한 형태로든 와동점성계수가 명확하게 평가된다면, 본 모형은 열을 이룬 물체 배후에서 평균류의 흐름분포를 평가하는 데 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 이종섭, 박일흠, 1995. 수하식 양식시설에 의한 유수저항의 평가와 수치모형, 한국수산학회지, **28**(5): 607-623.
- Arakawa, C., 1994. *Computational fluid dynamics for engineering*, Univ. of Tokyo Press.
- Falconer, R.A., 1994. An introduction to nearly-horizontal flows, In *Coastal, Estuary and Harbour Engineers' Reference Book*, edited by M.B. Abbott and W.A. Price, E and FN SPON, an imprinted of Chapman and Hall.
- Görtler, H., 1942. Berechnung von Aufgaben der freien Turbulenz auf Grund eines neuen Näherungsansatzes, *ZAMM*, **22**, pp. 244-254.
- Gran Olsson, R., 1936. Geschwindigkeits und Temperaturverteilung hinter einem Gitter bei turbulenter Strömung, *ZAMM*, **16**, pp. 257-267.
- Idelchik, I.E., 1960. Handbook of hydraulic resistance, U. S. Department of Commerce, National Technical Information Service, Report AEC-TR-6630 (translated from Russian).
- Munson, B.R., Young, D.F. and Okishi, T.H., 1994. *Fundamentals of fluid mechanics*, 2nd Ed., John Wiley & Sons.
- Reichardt, H., 1951. Gesetzmässigkeiten der freien Turbulenz, *VDI-Forschungsheft* 414 (1942), 2nd Ed..
- Schlichting, H., 1930. Über das ebene Windschattenproblem, *Diss Göttingen, Ing.-Arch.*, **1**, pp. 533-571.
- Schlichting, H., 1979. *Boundary layer theory*, 7th Ed., McGraw-Hill, New York (translated by J. Kestin).