
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 34 卷 第 4 號 1997年 11月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 34, No. 4, November 1997

조류 중에 놓인 V-형 구조물 주위의 연직순환류에 대한 연구

양찬규*, 홍기용*

Vertical Convection Flow around V-Shaped Structures in Uniform Current

by

Chan-Kyu Yang* and Keyyong Hong*

요 약

본 논문에서는 유한체적법을 이용한 수치계산과 이차원수조에서의 유동가시화에 의한 실험적 연구를 통해 평행하게 흐르는 유체 내에 설치된 V-형 연직순환 구조물 주위의 유동현상을 해석하였다. V-형 연직순환 구조물은 성층화되어 연직방향으로 정체된 유동장을 교란하여 섞어주는 역할을 하는 해수유동 제어구조물로서, 해상 구조물의 주변에 유동정체로 발생될 수 있는 부영양화 등을 감소시키는 도구로 사용될 수 있다.

판과 판의 사이각(dihedral angle; θ), 판의 바닥면에 대한 경사각(inclination angle; ϕ) 그리고 Reynolds 수에 대한 와류두(vortex head) 상승높이의 특성 및 유기속도(induced velocity)의 강도를 비교·검토함으로써 파라미터와 유동특성과의 관계를 살펴보았다. 또한 이를 통해서 연직순환 구조물의 최적형상은 사이각과 경사각이 90°일 때라는 결론을 얻을 수 있었다.

Abstract

In this paper, the flow around a V-shaped plate positioned against horizontal flow is numerically simulated by using finite volume method and experimentally visualized in two dimensional tank by dye injection method. The upwelling flow artificially induced by V-shaped plate mixes the stratified stagnant flow. It can be applied to mitigate the eutrophication and stratification of sea in the vicinity of offshore structures.

발 표 : 1996년도 대한조선학회 추계연구발표회 ('96. 11. 8.)

접수일자 : 1997년 1월 6일, 재접수일자 : 1997년 8월 27일

*정회원, 선박해양공학연구센터

Flow properties of the rising height of vortex head and the strength of induced velocity depend on the configuration of plate which is characterized by the dihedral angle(θ) and the inclination angle between plate and bottom(ϕ). The streamlines and the distributions of velocity and vorticity are examined by varying angles, θ and ϕ , and Reynolds number. Also, the relationships between parameters and the flow properties are described, and it is concluded that the optimum configuration of structure to induce the vertical convection is obtained when both dihedral angle and inclination angle are 90 degrees.

1. 서론

灣內 漁場의 수질환경을 개선하거나 대형 해양 구조물의 영향으로 정체되고 성층화된 해수의 수질을 양호한 상태로 유지하기 위해서는 폐수의 유입을 배제하고 해수교류 교환을 촉진시켜야 한다. 해수유동 촉진에는 주로 해류 및 파랑 등의 자연에너지가 이용되며, 이로써 충분치 않을 때는 기계·전기 에너지를 이용하기도 한다.

해수 교환장치는 대상해역의 유동 및 토질특성 등에 따라 적절히 선택되고 설치되어야 하지만 간단한 시공으로 지속적인 교환을 가능케 하는 장치로써 자연에너지를 이용한 구조물이 바람직하다. 자연에너지를 이용한 해수교환장치에는 作瀾 構造物, 道流提, 波浪利用 構造物, 循環流 構造物 그리고 鉛直循環 構造物 등이 있다[1]. 이 중 성층화된 유체를 연직방향으로 혼합해 줌으로써 해수오염을

방지할 수 있는 연직순환 구조물은 시공이 간단한 점과 대규모화가 용이한 점을 그 특성으로 들 수 있다[2].

본 논문에서 다루고자 하는 연직순환 구조물은 사이각(θ)을 갖는 V-형 판으로 지면에 대해 일정한 경사각을 지니며, 흐름이 V-형 판의 사이로 유입되어 판의 상단부로 넘어갈 때 발생하는 와류에 의해 연직순환류가 야기된다(Fig.1).

Hunt 등은 가시화기법을 이용하여 3차원 언덕에 의한 성층화된 유체의 유동현상을 관찰한 바 있고 [3], Asaeda 등은 Fig.1과 같은 V-형 연직순환 구조물에 대해 사이각(θ)을 달리하여 실험함으로써 $\theta=90^\circ$ 일 때 와류의 연직 상승높이가 최대가 됨을 입증한 바 있다[2],[4].

본 논문에서는 V-형 연직순환 구조물의 사이각(θ)과 경사각(ϕ)의 변화에 따른 와류의 특성을 수치계산 및 가시화실험을 통해 밝혀내고, 인자들과 유동특성(渦流頭의 상승높이, 유기속도의 강도 등)과의 상관관계를 도출하였다. 또한 Reynolds수가 이와 같은 유동에 있어서는 지배적인 파라미터가 되므로, Reynolds수에 대한 유동특성의 변화를 실험적으로 관찰했다.

비압축성, 점성 유체의 정상상태 유동을 가정한 3차원 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 일반 좌표계(generalized coordinate system)에 대해 표현하고, 유한체적법(finite volume method)을 이용하여 이산화함으로써 수치계산을 수행하였다. 가시화에 의한 실험적 해석에서는 염료투입법을 이용하였으며, 시간의 변화에 따른 와류의 전개양상 및 渦流頭(vortex head)의 상승높이(rising height)를 상류 쪽에서 투입된 염료에 의한 유적선(streak line)을 통해 관찰하였다.

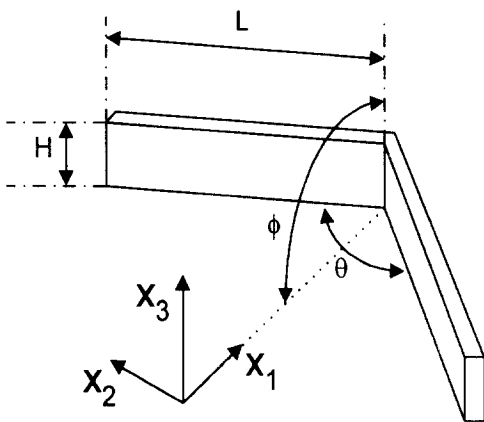


Fig.1 A configuration of V-shaped plate

2. 문제의 정식화

구조물의 가장자리에서 야기된 와류가 시간에 따라 전개되는 과정은 실험적으로 유동가시화를 통해 관찰하고, 수치적으로는 평균적인 유동현상을 보기 위해 정상상태 흐름을 가정했다. 유체특성은 해수에 대해 흔히 사용되는 것으로서 비압축성을 가정하였고, 점성을 고려하였다.

2.1 지배방정식

비압축성·점성유체의 정상상태흐름에 대한 질량보존법칙을 만족하는 연속방정식과 운동량 보존법칙을 만족하는 Navier-Stokes 방정식을 직교좌표계 (Cartesian coordinate system; x_1, x_2, x_3)에서 표현하면 다음과 같다[5].

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \tag{2}$$

여기서

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

ρ : fluid density,

μ : dynamic viscosity of the fluid,

p : pressure, u_i : velocity components.

2.2 좌표변환

지배방정식을 직교좌표계로 부터 일반좌표계(generalized coordinate system; ξ_1, ξ_2, ξ_3)로 좌표변환하면 다음 식과 같다[6].

$$\frac{\partial}{\partial \xi_i} (\rho U_i) = 0 \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \xi_m} \left(\rho U_m u_i - \frac{1}{J} \mu g^{mn} \frac{\partial u_i}{\partial \xi_n} \right) \\ = - \frac{1}{J} \frac{\partial \xi_m}{\partial x_i} \frac{\partial p}{\partial \xi_m} \end{aligned} \tag{4}$$

여기서

$$U_i = \frac{u_j}{J} \frac{\partial \xi_i}{\partial x_j}, \quad g^{ij} = \frac{\partial \xi_i}{\partial x_k} \frac{\partial \xi_j}{\partial x_k},$$

$$J = \frac{\partial(\xi_1, \xi_2, \xi_3)}{\partial(x_1, x_2, x_3)}.$$

2.3 경계조건

계산영역은 Fig.2에 보인 바와 같이 구조물로부터 L 만큼 떨어진 상류 쪽에 유입경계를 두어 균일속도를 분포시켰고, 5L만큼 떨어진 하류 쪽에 유출경계를 두어 경계면에 수직인 방향에 대해 속도 및 압력의 구배가 0이 되도록 하였다. 유동이 중심면에 대해 대칭이지만 중심면에 대칭면 경계를 부여하고 한쪽 영역만을 풀려면 직교격자(orthogonal grid)를 사용해야 하므로, 비직교 격자(non-orthogonal grid)를 사용하여 구조물의 양끝으로부터 2L만큼 떨어진 위치에 놓인 측면에 비투과 조건을 부여하고 슬립(slip)을 허용하여 중심면의 양쪽 영역을 모두 풀었다.

자유표면에는 선박유체역학에서 통용되고 있는 자유표면경계조건이 합당하지만 본 계산의 경우는 수심이 10H라는 점을 감안할 때 자유표면 효과가 크지 않으므로 대칭면으로 처리하여 슬립을 허용하고 비투과 조건을 부여했다. 바닥과 구조물의 표면에는 착벽조건을 적용하였다.

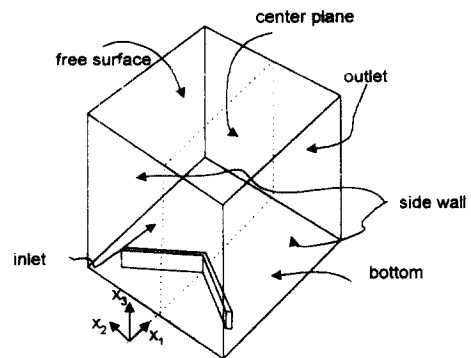


Fig.2 Computational domain

3. 수치해석 방법

3.1 유한체적법을 이용한 이산화

계산영역은 면과 면이 접하는 육면체 모양을 한 여러 개의 셀(cell)로 나뉘어지고(Fig.3), 각 셀에

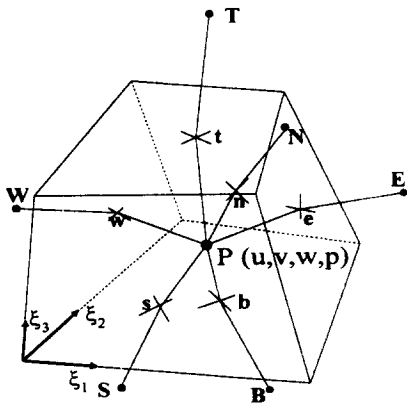


Fig.3 Configuration of a cell

대해 지배방정식을 적분함으로써 이산화가 이루어진다[7]. 엇갈리지 않은 격자계(non-staggered grid system)를 사용하게 되면 셀의 중앙에 스칼라(scalar)양과 속도성분이 모두 놓이게 되므로 형상을 나타내는 변수가 줄어들게 되어 메모리 크기를 최소화할 수 있고, 프로그램 작성시간이 단축되는 잇점이 있다. 하지만 연성된 속도와 압력을 분리할 때 "checker-board pattern"이 생기게 되므로 Rhie & Chow[8]에 의해 제안된 운동량 내삽법을 이용해 이 문제를 해결하였다.

연속방정식(3)을 $\Delta\xi_1 = \Delta\xi_2 = \Delta\xi_3 = 1$ 이고 중심점이 P인 임의의 셀에 대해 적분하여 이산화하면, 다음 식과 같이 쓸 수 있다. 아래 식에서 w, e, s, n, b, t는 계산 중심셀 각 면의 중심점을 의미한다 (Fig.3).

$$\begin{aligned} & \rho U_1 \Big|_w^e + \rho U_2 \Big|_s^n + \rho U_3 \Big|_b^t \\ &= \left\{ \frac{\rho}{J} \frac{\partial \xi_1}{\partial x_i} u_j \right\}_e - \left\{ \frac{\rho}{J} \frac{\partial \xi_1}{\partial x_i} u_j \right\}_w \\ &+ \left\{ \frac{\rho}{J} \frac{\partial \xi_2}{\partial x_i} u_j \right\}_n - \left\{ \frac{\rho}{J} \frac{\partial \xi_2}{\partial x_i} u_j \right\}_s \\ &+ \left\{ \frac{\rho}{J} \frac{\partial \xi_3}{\partial x_i} u_j \right\}_t - \left\{ \frac{\rho}{J} \frac{\partial \xi_3}{\partial x_i} u_j \right\}_b = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

운동량 방정식 (4)는 대류-확산항, 압력항 그리고 교차미분항(cross derivative terms)으로 분류되고 각 항들은 아래와 같이 이산화된다.

우선 대류-확산항의 ξ_j -방향 성분을 예를 들어

적분하면 식(6)과 같이 대류항이 셀의 면중심 속도를 포함하게 된다. 본 논문에서는 면중심의 속도를 하이브리드 도식(Hybrid scheme)[9]을 이용해서 셀 중심의 속도로 표현해 주었다.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega(\xi_i)} \frac{\partial}{\partial \xi_1} \left(\rho U_1 u_i - \mu \frac{\xi^{11}}{J} \frac{\partial u_i}{\partial \xi_1} \right) d\Omega(\xi_i) \\ &= \left(\int \rho U_1 d\xi_2 d\xi_3 \right)_e (u_i)_e \\ &- \left(\int \rho U_1 d\xi_2 d\xi_3 \right)_w (u_i)_w \\ &- \left(\int \mu \frac{\xi^{11}}{J} d\xi_2 d\xi_3 \right)_e \{ (u_i)_E - (u_i)_P \} \\ &+ \left(\int \mu \frac{\xi^{11}}{J} d\xi_2 d\xi_3 \right)_w \{ (u_i)_P - (u_i)_W \} \\ &= (A_E + A_W)(u_i)_P - A_E(u_i)_E - A_W(u_i)_W \end{aligned} \quad (6)$$

여기서

$\Omega(\xi_i)$ = volume of a cell,

$A_E = D_e \max(0, 1 - 0.5|R_e|) + \max(-F_e, 0)$,

$A_W = D_w \max(0, 1 - 0.5|R_w|) + \max(F_w, 0)$,

$R = F/D$: cell Reynolds number,

$F = \left(\int \rho U_1 d\xi_2 d\xi_3 \right)$, $D = \left(\int \mu \frac{\xi^{11}}{J} d\xi_2 d\xi_3 \right)$.

압력항을 적분하면 다음 식과 같이 이산화할 수 있다.

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega} \frac{1}{J} \left\{ \frac{\partial \xi_m}{\partial x_i} \frac{\partial p}{\partial \xi_m} \right\} d\Omega \\ &= - \left(\int \frac{1}{J} \frac{\partial \xi_1}{\partial x_i} d\xi_2 d\xi_3 \right)_P (p_e - p_w) \\ &- \left(\int \frac{1}{J} \frac{\partial \xi_2}{\partial x_i} d\xi_3 d\xi_1 \right)_P (p_n - p_s) \\ &- \left(\int \frac{1}{J} \frac{\partial \xi_3}{\partial x_i} d\xi_1 d\xi_2 \right)_P (p_t - p_b) \end{aligned} \quad (7)$$

교차미분항은 적분하여 얻어지는 1차 미분항을 2차 중앙차분식으로 이산화하여 소스소스(source)항에 포함시켰다. 이산화된 각 항을 정리해서 다시 쓰면 운동량방정식의 이산화된 형태를 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$A_P (u_i)_P = A_E(u_i)_E + A_W(u_i)_W + A_N(u_i)_N + A_S(u_i)_S + A_T(u_i)_T + A_B(u_i)_B + S_u \quad (8)$$

여기서

$$S_u = C_1^i(p_w - p_e) + C_2^i(p_s - p_n) + C_3^i(p_b - p_t) + S_U^V \text{ (cross derivative term) ,}$$

$$C_1^i = \left(\int \frac{1}{J} \frac{\partial \xi_1}{\partial x_i} d\xi_2 d\xi_3 \right)_P$$

$$C_2^i = \left(\int \frac{1}{J} \frac{\partial \xi_2}{\partial x_i} d\xi_3 d\xi_1 \right)_P$$

$$C_3^i = \left(\int \frac{1}{J} \frac{\partial \xi_3}{\partial x_i} d\xi_1 d\xi_2 \right)_P$$

SIMPLEC 알고리즘에 의하면 운동량방정식을 이용하여 셀 중심의 속도수정식을 유도할 수 있고, 하향이완계수(α_v)를 이용하면 다음 식과 같이 쓸 수 있다[8].

$$(u_i)_P = \alpha_v \sum_{j=1}^3 D_j^i (p_w - p_e) / (1 - \alpha_v \sum A_{NB}/A_P) \quad (9)$$

여기서

$$D_j^i = C_j^i / A_P,$$

NB = geometrical center of neighbouring cell ,

p' = correction pressure.

운동량 내삽법을 이용하면 셀 중심의 속도수정에 대응하는 셀 면의 속도수정방정식을 아래 식과 같이 유도할 수 있다.

$$(u_i)_w = \alpha_v \overline{D_1^i} (p_w - p_P) / (1 - \alpha_v \overline{\sum A_{NB}/A_P}) \quad (10)$$

여기서 바(bar)는 각 계수들의 현재 셀의 중심점 (P)과 이웃 셀(W)의 중심점 값들의 평균치를 의미한다.

식(10)을 식(5)에 대입하면 다음과 같이 수정압력 p' 에 대한 압력수정방정식을 얻을 수 있다.

$$A_P \overline{p'_P} = A_E \overline{p'_E} + A_W \overline{p'_W} + A_N \overline{p'_N} + A_S \overline{p'_S} + A_T \overline{p'_T} + A_B \overline{p'_B} \quad (11)$$

여기서

$$A_P = A_E + A_W + A_N + A_S + A_T + A_B$$

$$A_W = \left\{ \alpha_v \frac{\rho}{J} \left(\frac{\partial \xi_1}{\partial x_1} \overline{D_1^1} + \frac{\partial \xi_1}{\partial x_2} \overline{D_1^2} + \frac{\partial \xi_1}{\partial \xi_3} \overline{D_1^3} \right) / \left(1 - \alpha_v \sum A_{NB}/A_P \right) \right\}_w$$

$$A_S = \left\{ \alpha_v \frac{\rho}{J} \left(\frac{\partial \xi_2}{\partial x_1} \overline{D_2^1} + \frac{\partial \xi_2}{\partial x_2} \overline{D_2^2} + \frac{\partial \xi_2}{\partial \xi_3} \overline{D_2^3} \right) / \left(1 - \alpha_v \sum A_{NB}/A_P \right) \right\}_s$$

$$A_B = \left\{ \alpha_v \frac{\rho}{J} \left(\frac{\partial \xi_3}{\partial x_1} \overline{D_3^1} + \frac{\partial \xi_3}{\partial x_2} \overline{D_3^2} + \frac{\partial \xi_3}{\partial \xi_3} \overline{D_3^3} \right) / \left(1 - \alpha_v \sum A_{NB}/A_P \right) \right\}_b$$

3.2 계산 알고리즘

앞 절에서 유도한 선형방정식은 Stone에 의해 제안된 SIP(Strongly Implicit Procedure)를 이용해서 풀었고[10], 연성된 속도와 압력을 분리해서 풀기 위해 사용한 SIMPLEC 알고리즘의 순서도 [11]는 대략 다음과 같다. (a)셀 중심의 압력과 속도를 가정하고, (b)3개의 운동량방정식 (8)을 풀어 속도를 구한 후 (c) 압력수정방정식 (11)을 풀어 얻은 수정압력으로 속도 및 압력을 수정해 준다. (d)해가 수렴하지 않으면, 계산된 속도와 압력을 가지고 초기단계로 돌아가서 해가 수렴할 때까지 반복적인 계산을 수행한다.

4. 유동가시화 실험

계산 결과의 검증 및 상호보완적인 해석을 목적으로 유동가시화 실험을 수행하였다. 실험은 선박 해양공학연구센터의 2차원 수조에서 이루어졌고, 가시화 방법은 유적선을 관찰할 수 있는 염료투입법을 이용하였다[12],[13].

수조의 길이, 폭 그리고 깊이는 각각 25m, 60cm 그리고 50cm이며, 비정상상태 유동을 관찰하기 위해 두 대의 비디오 카메라를 수조 옆과 위쪽에 배치하였고 유적선의 순간사진(snapshot)을 찍기 위해 수조의 옆쪽에 수동카메라 한 대를 설치하였다(Fig. 4). 유동의 불안정성으로 인한 염료의 확산을 감소시키기 위해 유도베인(guide vane)

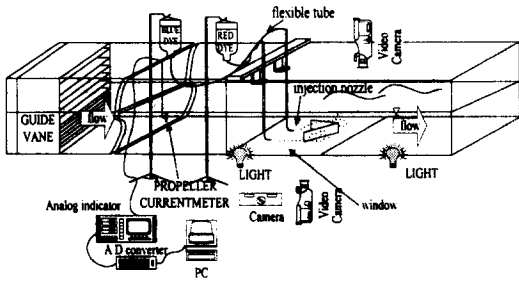


Fig.4 Equipments for the experiment

을 별도로 제작해서 조류발생기 유출구 쪽에 두었다. 구조물 중심의 상류 쪽에는 UNICION NAVY BLUE H-ER을, 측면의 상류쪽에는 CATIONIC RED RP를 동시에 분사하여 옆쪽에서 생성된 와류가 중심부로 전개하면서 섞이는 3차원적 유동현상을 관찰하였다. 구조물로부터 충분히 떨어진 상류 쪽에는 프로펠러 유속계를 두어 유입되는 속도를 측정하였다.

5. 결과 및 토론

V-형 판의 높이와 길이는 고정하고, Table 1과 같은 사이각과 바닥에 대한 경사각에 대해 실험 및 계산을 수행했다. 일정한 크기의 구조물을 사용하였으며, 따라서 서로 다른 사이각과 경사각에 대해 흐름방향에 수직인 면에 투영된 구조물의 투영면적이 각각 달라진다. 예를 들면 같은 사이각에 대해 경사각이 90°인 경우가 60°인 경우보다 투영면적이 크고, 사이각도 마찬가지이다.

Reynolds수는 8000인 경우에 대해 계산했고, 실험은 이외에도 3760과 5980인 경우를 추가해서 Reynolds수에 대한 변화를 관찰했다. Reynolds수는 다음 식과 같이 정의하였다.

$$R_n = \frac{U_o H}{\nu} \tag{12}$$

여기서

- U_o = mean velocity imposed at inlet,
- H = height of the plate (= 0.08 m),
- ν = kinematic viscosity of fluid.

Table 1 Examined cases

parameters	computation	experiment
Dihedral angle (θ)	30°, 60°, 90°, 150°, 180°	
Inclination angle (ϕ)	60°, 90°	
Reynolds number (Rn)	8000	3760
		5980
		8000

계산에는 흐름방향×폭방향×깊이방향 각각 60×30×40개의 비직교 격자를 사용했다(Fig.5).

계산과 실험에서 나타나는 V-형 연직순환 구조물 주위의 유동현상을 Fig.6에 개략적으로 보였다. 구조물 상단부의 박리에 의한 와류는 하류로 진행하면서 중심면으로 모여들어 반대편에서 만들어진 와류와 만나 편자형 와류선(horse-shoe shaped vortex line)을 형성하고, 흐름방향으로 떨어져 나간다(shedding). 이 편자형 와류는 유체의 상승운동으로 인해 상승하며 늘어났다(stretching). 이와 같은 와류의 운동이 계속되면서 구조물의 후류 쪽에서 와류가 주기적으로 떨어져나가는 것을 관찰

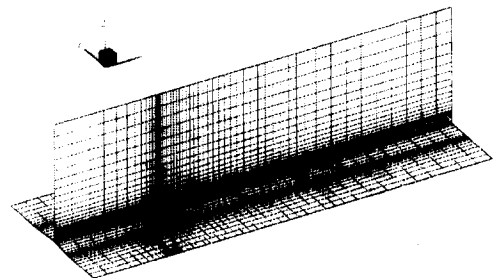


Fig.5 A Mesh configuration

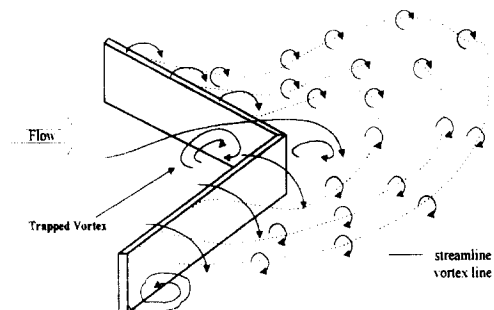


Fig.6 An outline of flow pattern

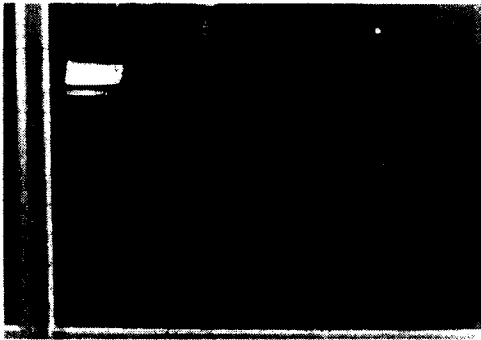


Fig.7 Periodical vortex shedding and stretching

할 수 있었고, Fig.7에 그 순간사진을 보였다.
 계산에 의하면 구조물의 바로 앞쪽 상류부에서 구조물을 넘어가지 못하는 작은 와류가 형성되고 실험에서도 이 부분에서 염료가 갇혀서 빠져나가지 못하고 물을 혼탁하게 하는 현상이 관찰되었다. 수치계산에 의해 얻어진 서로 다른 사이각에 대한 유선형상의 예를 Fig.8 - Fig.10에 보였다. 상



Fig.10 Stream Line Pattern($\theta = 150^\circ, \phi = 90^\circ$)

류부에서 구조물과 같은 높이에 있고 흐름에 수직인 선분 상에서 시작되는 유선을 택했다. 중심면의 유선으로부터 渦流頭의 상승높이를 볼 수 있고, 양쪽의 유선리본(stream ribbon)은 주흐름방향과 수직이고 바닥과 평행한 선분위의 점들에서 시작되는 유선의 연속으로서 그 꼬임의 정도 등에 의해 와류의 세기 및 방향을 간접적으로 볼 수 있다. $\theta = 150^\circ$ 인 경우는 양쪽 끝에서 유선 리본의 꼬임이 약간 보일 뿐 이것이 흐름방향 와류성분이 그리 크지 않아서 중심면의 후류부에 큰 영향을 주지 못한다. 사이각이 감소함에 따라서 유선 리본의 꼬임이 증가하고 $\theta = 30^\circ$ 인 경우는 양쪽 끝에서의 유선 리본이 심하게 감기면서 중심면으로 몰리는 것을 볼 수 있다. 결국 사이각의 크기가 감소할수록 와류의 길이 스케일은 감소하고 중심면에 와류가 도달하는 거리가 짧아진다. 이 영향으로 중심면에서 후류부의 속도분포가 사이각에 따라 달라짐을 알 수 있다.

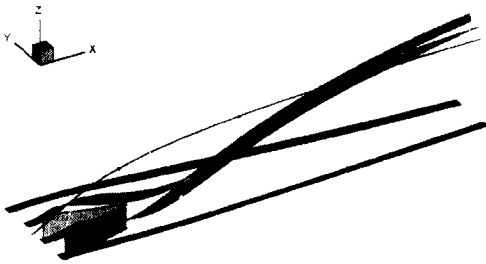


Fig.8 Stream line pattern($\theta = 30^\circ, \phi = 90^\circ$)

경사이각이 60° 인 경우 연직속도 성분이 사이각이 90° 일때가 150° 일때보다 확연히 커지고 90° 인 경우와 30° 인 경우는 연직속도의 분포 위치가 서로 다르므로 정량적인 차이를 비교하기는 힘들다(Fig.11-Fig.13).

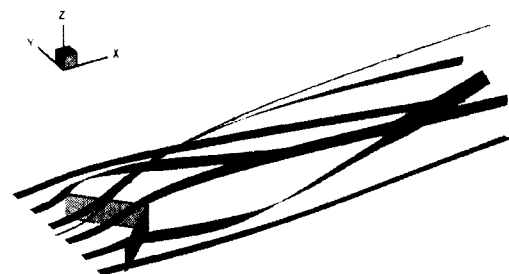


Fig.9 Stream line pattern($\theta = 90^\circ, \phi = 90^\circ$)

유선이나 유속분포만으로는 구조물의 형상변화에 따른 유동장의 변화량을 정량적으로 비교할 수가 없으므로, 다음 식과 같이 공간 평균된 유기속도를 그 지표로 제시해보았다. 이 식을 이용하여 계산영역 내에서 단위체적 당 발생된 유기속도를 비교하였으며, 그 결과를 Fig.14에 보였다.

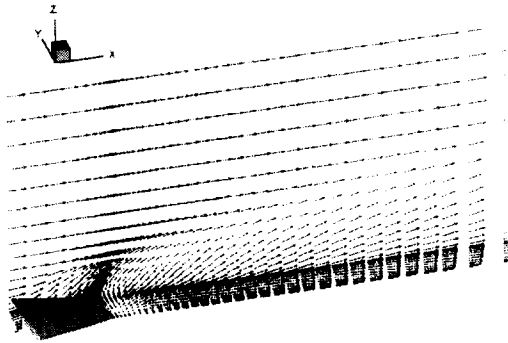


Fig.11 Velocity distributions
($\theta=30^\circ, \phi=60^\circ$)

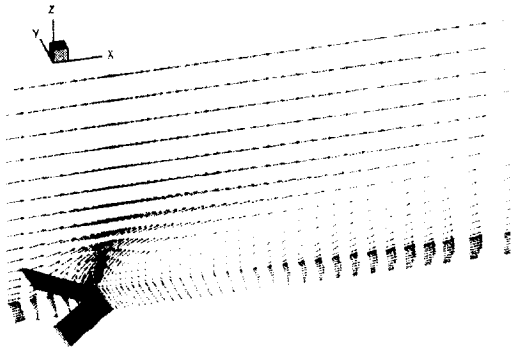


Fig.12 Velocity distributions
($\theta=90^\circ, \phi=60^\circ$)

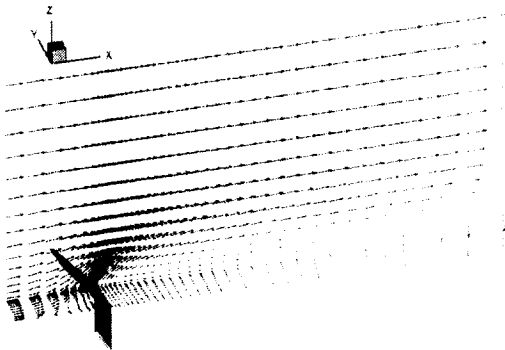


Fig.13 Velocity distributions
($\theta=150^\circ, \phi=60^\circ$)

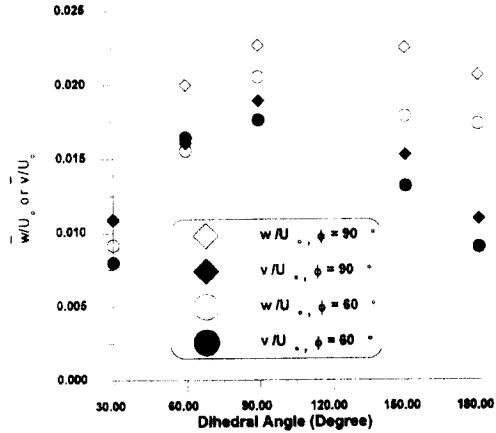


Fig.14 Induced velocities by V-shaped plate

$$\bar{v} = \frac{1}{V} \int |v| dV \quad (13)$$

$$\bar{w} = \frac{1}{V} \int |w| dV$$

여기서

v and w induced velocities,

V : total volume of computational domain,

ΔV : the volume of a cell.

전반적으로 연직속도(vertical velocity; w)가 폭방향 속도(spanwise velocity; v)에 비해 크게 나타나고, 사이각이 증가함에 따라 연직속도와 폭방향 속도의 차이가 크게 나타난다. 유기속도가 최대인 경우는 $\theta=90^\circ$ 일 때이고, $\theta>90^\circ$ 인 경우는 흐름방향 와류에 의한 상승 운동은 약하지만 유동을 교란하는 범위가 투영면적의 증가로 인해 넓어 지므로 투영면적의 영향을 비교적 적게 받는 폭방향 속도에 비해 연직속도가 크게 나타난다. $\theta<90^\circ$ 인 경우는 투영면적이 사이각의 감소에 따라 큰 폭으로 감소하므로, 유동 교란범위가 작아 짐으로써 생기는 연직속도의 감소율이 흐름방향 와류에 의한 상승률에 비해 커서 전체적인 연직속도는 크게 감소한다.

실험에 의해 계측된 중심면 상의 渦流頭의 상승 높이를 비교해 보면(Fig.15), 사이각이 90° 일 때 상승높이가 최대가 되고 이보다 큰 경우와 작은 경

우의 상승높이 감소율이 연직속도 감소율과 반대의 경향을 보인다. 즉, 사이각이 90°보다 커질수록 구조물 양쪽에서 생성된 와류가 중심면으로 모이지 못하고 중심면의 와류와 평행하게 하류부로 진행하므로 중심면에서의 상승운동에 영향을 미치지 못하는 반면 90°보다 작아질수록 양쪽에서 형성된 와류가 중심면에서의 국부적인 상승운동을 강화시킨다.

같은 Reynolds수에 대한 실험 및 계산 결과를 Fig.16에서 渦流頭의 상승높이로 비교해보았다. 전

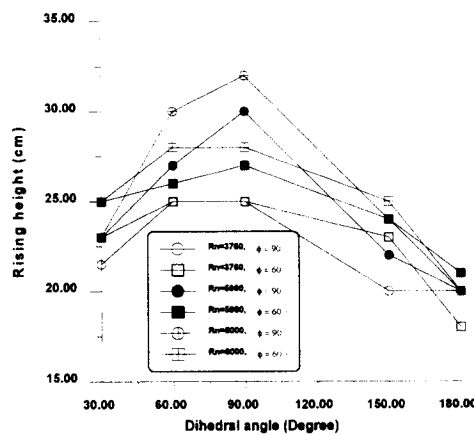


Fig.15 Rising height of vortex head (experiment)

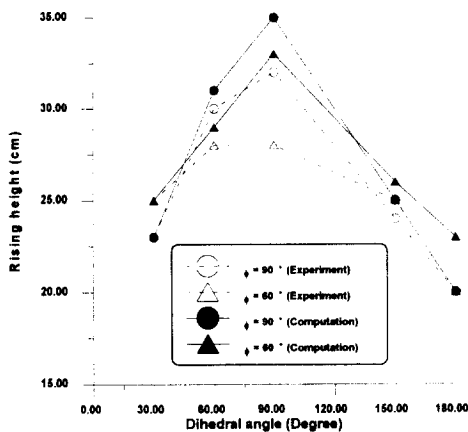


Fig.16 Rising height of vortex head (Experiment and computation : Rn=8000)

반적으로 계산이 실험에 비해 상승높이가 높지만 같은 경향을 나타내고 있다. 실험과 계산결과와의 차이는 염료입자의 중력에 의한 침강, 실험 시 유입속도의 불균일성 그리고 실제 유동의 비정상성 및 난류현상에 의한 변동(fluctuation) 등으로 설명될 수 있다.

6. 결론

수치계산과 유동가시화에 의한 실험을 상호보완적으로 이용하여 V-형 연직순환 구조물 주위의 유동현상을 규명하고, 판과 판 사이각과 바닥에 대한 경사각 및 Reynolds수의 변화에 따른 유동특성의 변화를 비교해 보았다. 계산과 실험은 정량적으로는 차이가 있지만 정성적으로는 일치하는 결과를 보이고 있고, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

구조물 상단부에서 박리에 의해 생긴 와류가 구조물을 따라 중심면으로 진행하면서 반대편에서 형성된 와류와 만나 편자형 와류선을 이루고, 후류부로 떨어져나가면서 자체의 상승운동에 의해 상승하게 된다.

사이각이 작아질수록 주 흐름방향에 수직인 평면에 투영된 구조물의 투영면적이 작아지므로 투영면적에 민감한 연직속도와 덜 민감한 폭방향 속도의 차이가 커진다.

사이각이 작을수록 와류에 의해 연직속도성분이 국부적으로 증가할 수 있지만 상대적으로 투영면적이 작아지므로 흐름을 교란하는 영역이 작아진다.

경사각이 작아지면 상승운동을 국부적으로는 크게 할 수 있지만 투영면적이 작아지므로 마찬가지로 전체적인 연직속도는 감소한다.

V-형 연직순환 구조물의 최적형상은 사이각 및 경사각이 모두 90° 일 때이며, 이 조건에서 연직속도 및 渦流頭의 상승높이가 모두 최대가 된다.

참 고 문 헌

[1] 全國沿岸漁業振興開發協會, "沿岸漁場整備開發事

- 業實施設計指針, 1992
- [2] Asaeda, T., Nakai, M., Tamai, N. and Horikawa, K., "V子形構造物에 의한 上昇流," 土木學會論文集, vol.423, pp.83-90, 1990
- [3] Hunt, J.C.R. and Snyder, W.H., "Experiments on Stably and Neutrally Stratified Flow over a Model Three-dimensional Hill," *J. Fluid Mech*, vol.96, part4, pp.671-704, 1980
- [4] Asaeda, T., Goami, Y., and Yoshida, K., "V子形構造物에 의한 鉛直循環流와 成層中에의 效率," 海洋開發論文集 Vol.7, pp.387-392, 1991
- [5] Schlichting, H., *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, 1979
- [6] Hoffmann, K.A. and Chiang, S.T., *Computational Fluid Dynamics for Engineers*, Engineering Education System, 1993
- [7] Patankar, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington, D. C., 1980
- [8] Rhee C.M. and Chow W.L., "A Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Isolated Airfoil with Trailing Edge Separation," *AIAA Journal*, Vol.21, pp.1525-1532, 1983
- [9] Spalding D.B. "A Novel Finite Difference Formulation for Different Expressions Involving both First and Second Derivatives," *Int. J. Num Methods Eng.*, Vol.4, pp.551, 1972
- [10] Stone, H.L., "Iterative Solution of Implicit Approximations of Multidimensional Partial Differential Equations," *SIAM J. Numer. Anal.*, Vol.5, pp.530-558, 1968
- [11] Jang, D.S., Jetli, R. and Acharya, S., "Comparison of the PISO, SIMPLER and SIMPLEC Algorithms for the Treatment of Pressure-Velocity Coupling in Steady Flow Problems," *Numerical Heat Transfer*, Vol. 10, pp.209-228, 1986
- [12] The Japan Society of Mechanical Engineers, *Visualized Flow-Fluid Motion in Basic and Engineering Situations Revealed by Flow Visualization*, Pergamon Press, 1990
- [13] Merzkirch, W., *Flow Visualization*, Academic Press, 1974