

# 구 후류에 미치는 유동장 밀도 성층화 영향 전산 해석

이승수<sup>†</sup> · 양경수\* · 박찬욱\*\*

(2003년 12월 11일 접수, 2004년 3월 20일 심사완료)

## Numerical Study for Effects of Density-Stratification on Wake Behind a Sphere

Sungsu Lee, Kyung-Soo Yang and Chan Wook Park

**Key Words :** Stratification(성층화), Unsteady Vortex(비정상 와류), Sphere(구), Finite Element Method(유한요소법), Vortex Shedding(와홀림)

### Abstract

Stratified flow past a three-dimensional obstacle such as a sphere has been a long-lasting subject of geophysical, environmental and engineering fluid dynamics. In order to investigate the effect of the stratification on the near wake, in particular, the unsteady vortex formation behind a sphere, numerical simulations of stratified flows past a sphere are conducted. The time-dependent Navier-Stokes equations are solved using a three-dimensional finite element method and a modified explicit time integration scheme. Laminar flow regime is considered, and linear stratification of density is assumed under Boussinesq approximation. The computed results include the characteristics of the near wake and the unsteady vortex shedding. With a strong stratification, the separation on the sphere is suppressed and the wake structure behind the sphere becomes planar, resembling that behind a vertical cylinder.

### 기호설명

$C_D$  : 무차원 저항 계수,  $F_D / \frac{1}{8} \rho_0 U^2 \pi D^2$   
 $D$  : 구의 직경  
 $N$  : 밀도 성층화의 부력 주파수 (buoyancy frequency),  $\sqrt{-g \rho'_s / \rho_0}$   
 $n_j$  : 경계의 수직 방향 단위 벡터의  $j$  축 방향의 성분  
 $f$  : Vortex Shedding 주파수  
 $F_D$  : 저항  
 $Fr$  : Froude 수,  $U/ND$   
 $g$  : 중력가속도  
 $p(x_j; t)$ : 동압력

$p_i$  : 전압력  
 $Re$  : Reynolds 수,  $UD/\nu$   
 $St$  : Strouhal 수,  $fD/U$   
 $t$  : 시간  
 $U$  : 유입 유속  
 $u_j$  :  $j$  축 방향의 유속  
 $x_j$  : 직교 좌표계 ( $j=1,2,3$  은 각각  $x, y, z$ )

### 그리스문자

$\delta_{ij}$  : Kroenecker Delta 함수  
 $\Gamma$  : 유한요소의 경계  
 $\nu$  : 동역학적 점성 계수  
 $\mu$  : 동점성 계수

$\rho(x_j; t)$ : 변동 밀도  
 $\rho_b(z)$  : 수직방향 성층화 밀도 분포 (stratified density distribution)  
 $\rho_0$  : 기준 밀도  
 $\rho_i$  : 전 밀도

† 책임저자, 회원, 충북대학교 구조시스템공학과  
 E-mail : joshua@chungbuk.ac.kr  
 TEL : (043)261-3344 FAX : (043)276-3341

\* 회원, 인하대학교 기계공학과

\*\* 회원, 대불대학교 기계공학과

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &: \text{응력}, -p\delta_{ij} + \tau_{ij} \\ \tau_{ij} &: \text{무차원화된 전단응력}, \frac{1}{\text{Re}}(u_{i,j} + u_{j,i}) \\ \Omega &: \text{유한요소} \end{aligned}$$

## 1. 서론

밀도차에 의한 성층류 (density-stratified flow) 측에 위치한 물체 주위의 유동은 유체 역학적인 관점 뿐만 아니라 산악 지형과 같은 실지형을 지나 는 대기의 움직임<sup>(1)</sup>이나 수중을 지나 는 운동체 주위의 유동과 관련하여 자연 과학 뿐만 아니라 공학의 측면에서 지속적인 관심의 대상이 되어왔다. 성층류의 일반적인 특성으로는 밀도가 균일한 (homogeneous) 유입 유동의 경우와 비교하여, 물체 후류에서 유동장이 밀도의 등가평면을 따라 평면화되는 특성을 나타낸다.<sup>(2)</sup>

대표적인 3 차원 물체인 구 주위의 성층류에 의한 유동장 변화의 물리적 특성을 이해하기 위하여 주로 실험적인 방법에 의한 선행 연구가 비교적 최근에 진행되어 왔다. Debler,<sup>(3)</sup> Debler 와 Fitzgerald<sup>(4)</sup>는 유동 가시화 방법에 의해 성층화의 정도가 높을 경우, 구 후면에서의 유동의 박리 현상 (separation)이 지체되는 현상을 관찰한 바 있으나 정성적인 관찰만 수행되었다. 이와 같은 정성적인 관찰은 Honji<sup>(5)</sup>에 의해서도 수행된 바 있다. Brighton<sup>(6)</sup>은 반구 (hemisphere)를 포함한 여러 가지 물체주위의 성층화 유동에 관한 실험을 수행하였는데, 성층화의 증가에 따라 후류는 평면화 되는 경향을 보이며 성층화의 정도가 증가함에 따라 von Karman Vortex 와 같은 후류내 Vortex Shedding 이 관찰되었다.

유동의 성층화 정도는 일반적으로 밀도의 분포가 수직 방향  $z$  의 함수라고 가정할 때, 수직 분포  $\rho_s(z)$  의 기울기에 의해 정의되는 부력 주파수  $N$  에 의해 나타내며, 이는 중력가속도와 대표 길이를 이용하여 의해 무차원화 주파수인 Froude 수로 나타낼 수 있다. 일정범위의 Froude 수와 Reynolds 수에 대한 구 주위 성층유동의 실험적인 결과로는 Lin et al,<sup>(7)</sup> Chomaz et al<sup>(8)</sup>의 연구가 있다. 이들의 결과에 의하면 성층화의 정도가 약한 경우 ( $\text{Fr} > 2.25$ ), 구 후류의 유동은 균일한 밀도를 갖는 유입 유동의 경우와 매우 유사하여 Reynolds 수에 의해 유동 특성이 결정된다. 성층화의 정도가 커짐에 따라 후류에 내부 중력과 (internal gravity wave)의 형성이 현저해지고, Fr 가 0.5 에 근접하게 되면 파고가 최대점에 이르며, 구 후면에서의 유동 박리현상은 거의 사라지는 것으로 관찰되었다. 성층화의 정도가 더욱 증가하면 유동의 박리는 다시 나타나고, Fr 가 0.5 보다 작아지면 후류의 수직방향 운동은 매우 제한되어 평면화되며 거의 2 차원 유동

특성을 보인다. Fr 가 0.25 보다 작아져 성층화가 매우 큰 경우에 이르면, 후류 내에는 2 차원 주상체의 후류에서 볼 수 있는 비정상 Vortex Shedding 이 발생하였다. 이러한 현상들은 Froude 수 이외에 Reynolds 수에 의해서도 그 특성이 결정되나, 성층화의 정도가 커짐에 따라 Reynolds 수에 대한 의존도는 상대적으로 감소하는 것으로 관찰되었다.<sup>(8)</sup>

한편, 구 주위의 성층류 유동 특성에 대한 수치 해석 연구는 매우 드문 편이다. Hanazaki<sup>(9)</sup>는 Reynolds 수가 200 인 경우, 성층화가 후류에 미치는 영향에 관하여 유한체적법을 이용하여 수치 해석을 수행하였다. 그러나, 비정상 수치 해석에도 불구하고 고려된 전 범위의 Froude 수에 대해 정상 (steady) 유동으로 계산되어, 실험적인 연구들에 의해 관찰된 바 있는 성층화가 큰 경우의 비정상 Vortex Shedding 은 보여주지 못하였다.

본 연구에서는 성층류 중에 있는 구 주위의 유동을 수치 해석함으로써 후류내의 비정상 유동을 모사하였다. 지배 방정식의 이산화는 Petrov-Galerkin 형의 유한요소법을 이용하였으며, 수정된 외재적 (explicit) 방법<sup>(9)</sup>에 의해 시간 적분을 수행하였다. 운동방정식의 부력항과 연계되어 추가된 밀도 전송 방정식은 Crank-Nicolson 방법에 의해 수치해석을 수행하였다.

본 연구에서는 Froude 수를 0.02 에서 100 까지 변화시키고 Reynolds 수 100, 200, 300 에 대하여 해석을 수행하여 성층화와 후류 특성 및 성층화와 Reynolds 수의 영향을 분석하였다. 특히, Reynolds 수 200 인 Hanazaki<sup>(10)</sup>의 경우의 결과에 대한 비교를 포함하였다. 본 연구에서 배경 밀도는 수직방향의 선형적 변화만을 가정하였다.

## 2. 문제의 정식화

비압축성, 점성 유체가 수직방향  $z$  로 밀도의 선형적 분포를 갖는 경우의 지배방정식은 다음과 같다.<sup>(11)</sup>

$$u_{j,j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_i(u_{i,j} + u_{j,i}) = -p_{,i} - \rho_i g \delta_{i3} + \mu(u_{i,j} + u_{j,i})_{,j} \quad (2)$$

$$\rho_{,i} + u_j \rho_{,i,j} = 0 \quad (3)$$

위 식의 아래 첨자 중  $i$  과  $j$  는 각각 시간과  $x_j$  방향에 대한 편미분을 나타낸다. 식 (3)의 밀도 전송 방정식에서 확산항은 무시하였다.

Boussinesq 가정에 의해 변동 밀도  $\rho$  의 크기가 기준 밀도  $\rho_0$  에 비해 작고 운동량 방정식의 부력항에만 영향을 미친다고 가정하면, 전압력  $p$ , 중정압력은 성층류의 밀도 변화에 따른 항과 서로

상쇄되고, 식 (2)와 (3)은 다음과 같이 단순화 된다.

$$u_{i,x} + u_j u_{i,j} = -p_x - \delta_{i3} \rho / Fr^2 + \tau_{ij} \quad (4)$$

$$\rho_x + u_j \rho_{,j} = u_3 \quad (5)$$

$$\rho'_b(z) < 0 \quad (6)$$

식 (4)와 (5)에서  $\rho$ ,  $u_j$ 와  $x_j$ 는 각각  $\rho_0$ ,  $U$ 와  $D$ 에 의해 무차원화 되었다. 따라서  $t$ 와  $p$ 는 각각  $D/U$ 와  $\rho_0 U^2$ 에 의해 무차원화 되었으며, 식 (5)에서 유입 유동의 수직 방향 밀도 분포의 기울기는 식 (6)과 같이 음수로서 선형변화를 가정하였다.

### 3. 수치 해석 기법

#### 3.1 유한요소법에 의한 이산화 및 경계조건

유한요소법에 의한 지배 방정식의 공식화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \psi u_{j,j} d\Omega &= 0 \\ \int_{\Omega} (\phi u_{i,x} + \phi u_j u_{i,j} + \phi_j \tau_{ij} - \phi_j p) d\Omega &= -\frac{\delta_{i3}}{Fr^2} \int_{\Omega} \phi \rho d\Omega + \int_{\Gamma} \phi \sigma_{ij} n_j d\Gamma \\ \int_{\Omega} (\phi \rho_x + \phi u_j \rho_{,j}) d\Omega &= \int_{\Omega} \phi u_3 d\Omega \end{aligned} \quad (7)$$

위 식의  $\phi$ 는 유속과 밀도 변수에 대한 가중 함수이며,  $\psi$ 는 압력에 대한 가중 함수이다. 본 연구에서는 유속 및 밀도에 대하여는 선형 유한 요소를 이용하였고, 압력은 각 유한 요소 내에서 일정한 것으로 가정하였다. 운동량 방정식은 수치 해석의 안정성을 위하여 유선상류도식(Streamline Upwind Method)<sup>(12)</sup>을 이용한 Petrov-Galerkin 형식을 적용하였다.

계산 영역의 유입면에서는 균일한 유속  $U$ 를 갖는 유동이 유입되는 것을 가정하였다. 유입 유동의 성층화의 영향은 식 (5)에서 보는 바와 같이 지배 방정식의 소오스 항으로 공식화되었으므로, 유입 유동의 변동 밀도는 없는 것으로 가정하였으며, 구의 표면에서는 No-slip 경계조건을 적용하였다. 계산 영역의 측면 및 출구면에서는 traction-free 조건 ( $\sigma_{ij} n_j = 0$ )을 적용하였다.

식 (7)의 비정상해를 구하기 위해서는 초기 조건이 요구된다.

본 연구에서는  $t=0$ 에 유입 유동이 시작되는 것으로 가정하였으며, 계산 영역 내 변동 밀도는 초기에 0으로 가정하였다.

#### 3.2 시간 적분

본 연구에서는 속도항 보정 방식<sup>(9,13)</sup>에 의해 시간 적분을 수행함으로써 식 (7)의 이산화된 지배 방정식의 비정상해를 구하였다. 그 과정은 다음과 같다.

각 시간 단계에서 Poisson 방정식에 의해 압력을 얻는다. 이때, 이전 단계에서 얻은 유속과 밀도를 이용한다. 유한 요소법의 특징인 요소들의 비구조적 연계성 (unstructured connectivity)에 의해 행렬은 매우 sparse 하며, 이를 위해 본 연구에서는 행렬 해법으로 PCG (Preconditioned Conjugate Gradient)를 이용하였다. 이때 압력을 위한 Poisson 방정식의 행렬은 Hermitian 이므로 행렬 요소의 연산은 계산의 초기에 한번만이 요구된다.

압력이 계산되면, 밀도 방정식을 시간 적분하게 되는데 식 (7)은 확산항이 없는 순 대류 방정식의 형태를 갖고 있어, 수치 해석의 안정성을 위해 Crank-Nicolson 방법을 이용하였다.

유속은 계산된 압력 및 밀도를 이용하여 운동량 방정식을 수정된 외재적 방법 (Modified Explicit Method)을 이용하여 시간 적분을 수행함으로써 얻을 수 있다. 주어진 시간 단계는 수치 해석의 안정성의 기준이 되는 CFL 수에 의해 결정되는 더 작은 준 시간 단계들로 세분되고, 각 세분된 준 시간 단계에서 운동량 방정식을 외재적 방법에 의해 시간 적분하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 계산영역 및 이산화

본 연구에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 길이와 직경이 각각  $20D$ 와  $12D$ 인 원통형 계산 영역을 설정하였으며, 구는 유입면으로부터  $3D$ 의 거리에 위치하도록 하였다. 계산 영역은 8개의 절점을 갖는 육면체와 6개의 절점을 갖는 삼각기둥의 복합 요소들로 이산화 하였으며, 구 주위에서 보다 조밀한 분포를 갖도록 하였다. 선형 계산을 통하여, 구 표면의 가장 작은 유한 요소의 크기를  $0.01D$ 로 정하였으며, 인접한 요소들의 크기 비는 수치 해석의 안정성을 위하여 1.1을 넘지 않도록 하였다. 계산에 이용된 유한 요소의 수는 48320인데 Fig. 2는 구 주위의 격자를 보이고 있다.

#### 4.2 균일 밀도류에 대한 해석 및 검증

본 연구의 선형단계로서 유입 유동이 균일한 밀도를 갖는 경우에 대하여 Reynolds 수 100에서 500까지의 비정상 유동의 수치해석이 수행된 바 있다.<sup>(14)</sup> 본 연구에서 이용된 수치 해석 방법을 검증하기 위하여, 성층화의 영향이 거의 무시되는 Froude 수 100의 경우를 수치 해석하여 이전의 결과와 비교함으로써 본 연구의 수치 해석 방법을

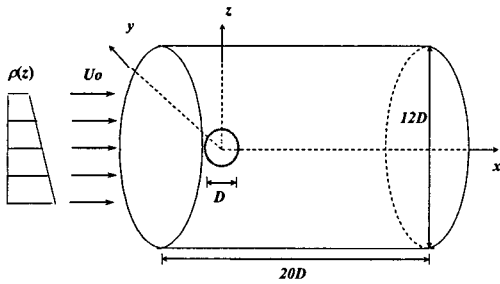


Fig. 1 Schematic diagram of computational domain

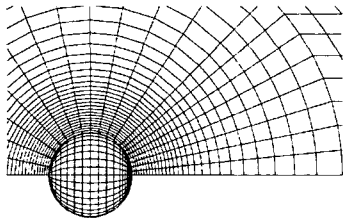


Fig. 2 Mesh distribution near sphere

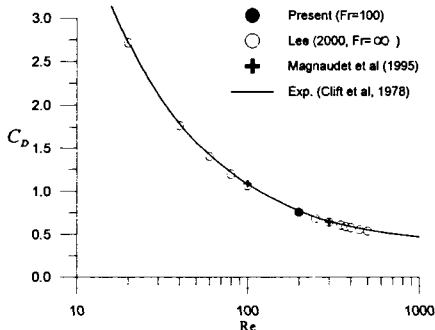


Fig. 3 Mesh Computed drag coefficient at Re=200 compared with previous studies near sphere

검증하였다. Reynolds 수는 서론에서 밝힌 바와 같이 200 으로 고정하였다.

Fig. 3은 계산된 저항 계수를 선행 연구<sup>(14)</sup> 및 실험 결과와 비교하고 있는데 좋은 일치율을 보여주고 있다. Re=200 에서 균일 유동의 경우 저항 계수는 선행 계산에 의해서 0.773, 본 연구에 의해서 0.771 을 얻어 실험에 의한 저항계수 0.775 과 1% 미만의 오차를 보여주었다.

4.3 성층화 변화에 따른 후류의 특성

Fig. 4는 각각 Reynolds 수가 200 이고 Froude 수가 100, 1 및 0.5 경우 수직면인 x-z 평면과 수평면인 x-y 평면의 유선 분포를 보여준다. 이미 위의 저항 계수의 검증에서 나타난 바와 같이 Froude 수가 100 인 경우 (a)는 균일 유동의 경우와 차이

가 없어 두 평면의 유속 분포가 일치하여 축대칭의 후류 분포를 보여주고 있고, 그 뒷면의 재순환 (recirculation) 구역이 잘 발달하여 있다. 성층화가 증가한 Froude 수 1 의 경우 (b), 수평면상의 유동 박리 위치는 Froude 수 100 의 경우와 거의 유사하나, 수직면 상의 박리점은 구 후미로 이동되고 있음이 관찰되었다. 이는 성층화가 증가함에 따라 내부 중력파의 파장이 점차 감소하고 파의 최저점이 구 후면에 근접함에 따라, 수직면상의 유선들이 x-축을 중심으로 밀집 하기 때문이다. Froude 수가 더욱 감소하여 0.5 (c)에 이르면, 후류의 재순환 영역은 붕괴되어 유선의 박리는 구 후면의 정점에서 발생하게 된다.

Lin 등<sup>(7)</sup>에 의하면, Re = 200 의 경우 Froude 수가 0.25 보다 작아지면 후류내에 von Karman vortex 와 같은 vortex shedding 이 관찰된 바 있다. 본 연구의 경우 유동장은 Froude 수가 0.2 까지는 정상상태를 유지하였으나, 그 보다 작은 Froude 수에서 후류의 평면화와 수평면상에 비정상 vortex shedding 이 발생하였다.

Fig. 5는 Re = 200 에서 Froude 수가 0.1 인 경우 수직 및 수평면상의 유선 및 유속 분포를 나타내고 있다. 비정상성으로 인해 vortex shedding 의 반주기 시간 간격의 유선과 유속 분포를 나타내었는데, 수직면상에서는 시간에 관계 없이 평면화된 유속 분포를 보여주고 있다. 이에 반해 수평면의 유속 분포는 원형 주상체 후류와 유사한 vortex shedding 이 잘 발달되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 Re = 200 에서 Froude 수가 0.1 인 경우 구에 작용하는 주유동 방향 (x)와 횡방향 (y) 동유체력 계수인  $C_x$  와  $C_y$  의 시간 이력을 보여준다.

Fig. 5에서 보여준 vortex shedding 의 효과가 잘 나타나고 있다. 이 같은 비정상 유동 현상은 이전의 수치 해석 연구인 Hanazaki<sup>(9)</sup>의 결과에서는 나타나지 않았던 결과이며, 실험 결과<sup>(7,8)</sup>와 일치하고 있다. Vortex shedding 에 의한 횡방향 동유체력  $C_y$  의 Strouhal 수는 Fr = 0.1 의 경우 0.196 으로 계산되었으며, 이 또한 실험치인 0.2<sup>(7,8)</sup>와 잘 일치하고 있다. 또한 Re = 200 인 균일 밀도 유동의 경우 원형 주상체의 Strouhal 수인 0.194<sup>(15)</sup> 와 비교할 때, 성층화에 의해 후류가 2 차원화 되었음을 확인할 수 있다. 한편, 주유동 방향 동유체력의 Strouhal 수는 약 0.398 로서 횡방향 Strouhal 수의 2 배를 나타냄으로써 역시 원형 실린더 후류의 Vortex shedding 특성과 유사함을 알 수 있다.

Fig. 7은 Froude 수 0.02~100, Reynolds 수 100~300 의 경우에 대한 후류의 유동 특성을 정상/비정상 상태로 분류하여 보여주고 있다. 결과에서 보는 것처럼 Reynolds 수 150- Froude 수 0.105 과 Reynolds 수 300- Froude 수 0.18 을 경계로 후류는 정상 상태에서 비정상 상태로 전환함을 알 수 있다. 균일 밀도 유동의 경우 구 후류에 발생하는

hairpin 형태의 vortex shedding 이 Reynolds 수  $300^{(16)} \sim 375^{(14)}$  이상에서 발생함을 고려할 때, 성층화에 의한 후류의 평면화와 유동의 2 차원화가 유동장의 불안정성을 야기하여 낮은 Reynolds 수에서 비정상 vortex shedding 이 발생하는 것으로 판단된다.

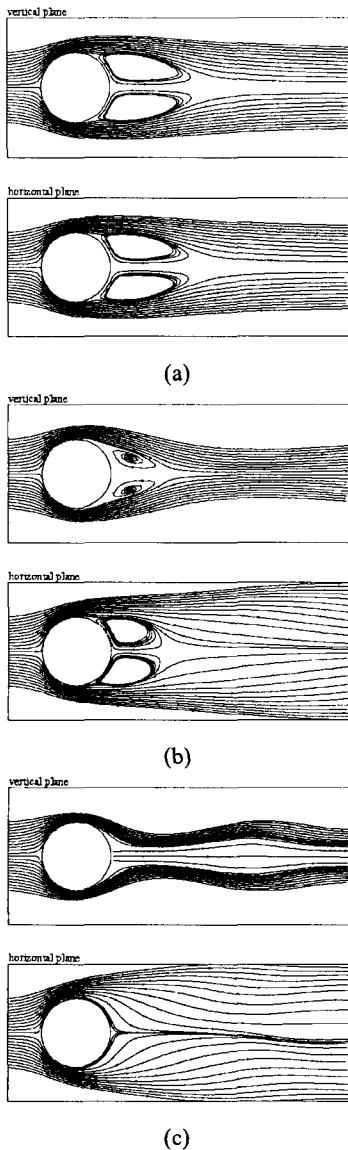


Fig. 4 Side views on vertical plane (x-z) and plan views on horizontal plane (x-y) of streamlines for  $Fr = 100$  (a), 1 (b) and 0.5 (c) at  $Re = 200$

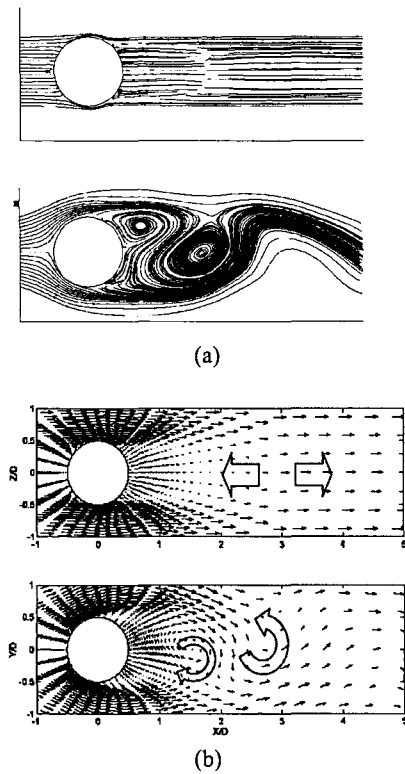


Fig. 5 Side views on vertical plane (x-z) and plan views on horizontal plane (x-y) of streamlines at  $t=0$  (a) and velocity vectors at  $t=T/2$  (b) for  $Fr = 0.1$  and  $Re = 200$ , where  $T$  is the corresponding vortex shedding period

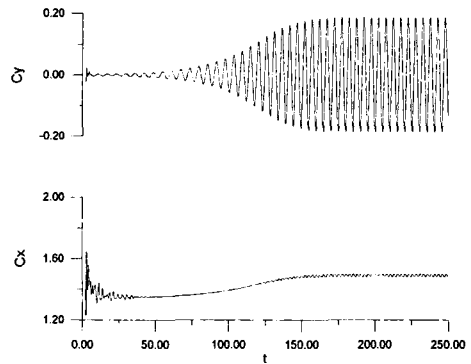


Fig. 6 Time history of force coefficients acting on the sphere in lateral ( $y$ ) and axial ( $x$ ) directions for  $Fr = 0.1$  and  $Re = 200$

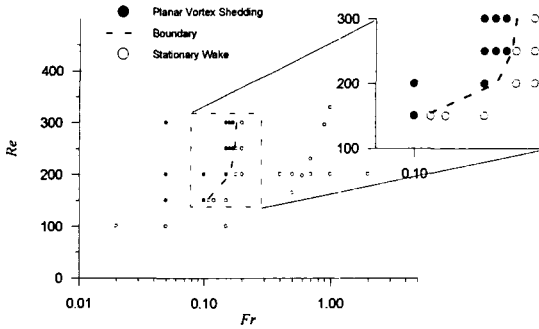


Fig. 7 Effects of Froude and Reynolds numbers on the characteristics of the wake behind sphere

Table 1 Effects of Froude and Reynolds numbers on Lateral Strouhal number

Fr	Re	150	200	250	300
0.05	0.181	0.202	N/C*	0.218	
0.1	0.158	0.196	N/C*	N/C*	
0.15	-	0.172	0.189	0.194	
0.18	-	-	-	0.132	

\* N/C : Not Computed

Table 1 은 Reynolds 수와 Froude 수 변화에 따른 횡방향 Strouhal 수의 변화를 나타낸다. Froude 수가 감소할수록, 또한 Reynolds 수가 증가할수록 Strouhal 수가 증가하여 Vortex Shedding 의 주기가 감소함을 알 수 있다. 이는 Froude 수의 증가에 따른 후류의 평면화 진행이 후류의 2 차원화를 촉진한 결과로 판단된다.

4.4 Froude 수가 박리점에 미치는 영향

Fig. 8 은 Froude 수 변화에 따른 유동 박리점의 변화를 나타내고 있다. 박리점의 위치는 구 후면의 정점을 기준으로, 본 연구의 결과를 Hanazaki<sup>(10)</sup>의 결과와 비교하였다.

앞에서 설명된 바와 같이 성층화가 증가는 내부 증력파의 파장 감소로 인하여 구 후면 가까이에서 수직면상의 유선을 밀집 시키는 결과를 가져오고, 따라서 유동의 박리점을 구 후미로 이동시킨다. Froude 수가 0.5 에 가까워지면, 박리는 구 후면의 정점에서 발생하게 된다. Froude 수가 더 감소하게 되면, 다시 박리점은 구의 전면을 향해 이동하나 이때 후류는 거의 수평면에 평행한 평면화가 나타나게 된다.

Fig. 8 에서 보는 바와 같이 본 연구의 결과는  $Fr > 0.5$  인 경우 수직면상의 박리 각도가 Hanazaki<sup>(9)</sup>의 결과 보다 크게 계산되었다. Hanazaki<sup>(9)</sup>의 결과와 큰 차이를 보이는 영역은 유동의 비정상성이 나타나는  $Fr < 0.2$  의 경우 수평면상의 박리점의 위치이다. Hanazaki 의 결과는 계속 박리 각도가 증가하는 것으로 나타나고 있는데 반해, 본 연구의

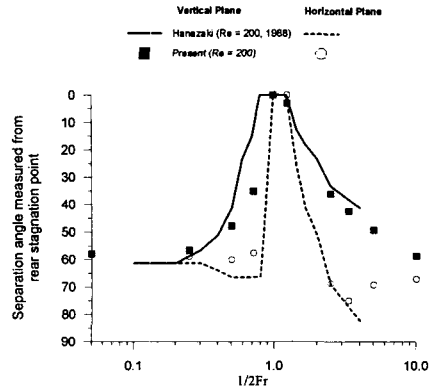


Fig. 8 Effects of Froude number on separation points on sphere

결과는 약 70 도 정도로 계산되었는데, 이는 원형 주상체의 경우  $Re = 200$  에서 박리 각도 68.5 도<sup>(15)</sup>와 매우 근사함을 알 수 있다

5. 결론

본 연구에서는 유입 유동이 수직 방향으로 밀도의 선형적 변화에 의해 성층화되어 있는 경우 구 주위의 유동을 Froude 수 0.02-100, Reynolds 수 100-300 에 대하여, 유한 요소법과 수정된 외재법에 의한 시간 적분에 의해 수치해석을 수행하였다. 계산 결과, 기존의 실험에 의해 보여진 성층화의 정도가 높은 경우 구 후류에 나타나는 비정상 vortex shedding 현상을 수치 해석에 의해 재현하였는데, 이는 선행된 Hanazaki<sup>(10)</sup>의 수치 해석에 의해서는 나타나지 않던 결과 이다. 그 외에 다음과 같은 특성이 계산에 의해 확인되었다.

(1) 성층화의 증가에 의해 내부 증력파의 파장이 감소하여 유동 박리점을 구 후미로 이동시키며,  $Fr = 0.5$ 에서 재순환 영역의 소멸을 야기한다.

(2)  $Fr < 0.2$ 인 경우 후류는 수직방향의 운동이 극도로 제한되어 거의 평면화되며, 원형 주상체 후류와 유사하게 비정상 vortex shedding이 발달한다.

(3) 후류의 비정상 vortex shedding의 Strouhal 수인 0.196와 시간평균 박리각 70도는 2차원 원형 주상체 후류의 특성과 매우 유사함을 보여주어, 성층화에 의한 후류의 평면 유동화 현상을 나타내고 있다.

(4) 후류의 비정상성은 Reynolds 수가 100인 경우  $Fr < 0.105$ , Reynolds 수가 300인 경우  $Fr < 0.18$ 로서 균일 밀도 유동의 경우 Reynolds 수 375이상에서 발생하는 비정상성과 비교할 때

성층화로 인한 유동장 2차원화의 결과로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 R01-2002-000-00060-0 지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

- (1) Hubert, L. F. and Krueger, A. F., 1962, "Satellite Pictures of Mesoscale Eddies," *Month. Weather Rev.*, Vol. 90, pp. 457~463.
- (2) Sheppard, P. A., 1956, "Airflow Over Mountains," *Quart. J. R. Met. Soc.*, Vol. 82, pp. 528~529.
- (3) Debler, W., 1972, "The Towing of Bodies in a Stratified Fluid," *Int. Symp. Stratified Flows*, ASCE, pp. 194~220.
- (4) Debler, W. and Fitzgerald, P., 1971, "Shadowgraph Observations of the Flow Past a Sphere and a Vertical Cylinder in a Density Stratified Liquid," *Tech. Rep. EM-71-3, Dept. of Engrg Mech., Univ. of Michigan*.
- (5) Honji, H., 1987, "Near Wakes of a Sphere in a Stratified Fluid," *Fluid Dyn. Res.*, Vol. 2, pp. 75~76.
- (6) Brighton, P. W. M., 1978, "Strongly Stratified Flow Past Three-Dimensional Obstacles," *Quart. J. R. Met. Soc.*, Vol. 104, pp. 289~307.
- (7) Lin, Q., Lindberg, W. R., Boyer D. L. and Fernando, H. J. S., 1992, "Stratified Flow Past a Sphere," *J. Fluid Mech.*, Vol. 240, pp. 315~354.
- (8) Chomaz, J. M., Bonneton P. and Hopfinger, E. J., 1993, "The Structure of the Near Wake of a Sphere Moving Horizontally in a Stratified Fluid," *J. Fluid Mech.*, Vol. 254, pp. 1~21.
- (9) Gresho, P. M., Chan, S. T., Lee, R. L. and Upson, C. D., 1984, "A Modified Finite Element Method for Solving the Time-Dependent, Incompressible Navier-Stokes Equations. Part I: Theory," *Int. J. Num. Methods Fluids*, Vol. 4, pp. 557~598.
- (10) Hanazaki, H., 1988, "A Numerical Study of Three-Dimensional Stratified Flow Past a Sphere," *J. Fluid Mech.*, Vol. 192, pp.393~419.
- (11) Gill, A. E., 1982, *Atmosphere-ocean dynamics*, Academic Press, San Diego, CA, USA.
- (12) Brooks, A. and Hughes, J. R., 1982, "Streamline Upwind/Petrov-Galerkin Formulations for Convection Dominated Flows with Particular Emphasis on Incompressible Navier-Stokes Equations," *Comp. Methods in App. Mech. Eng.*, Vol. 32, pp. 199~259.
- (13) Chan, S. T., Gresho, P. M., Lee, R. L. and Upson, C. D., 1981, "Simulation of Three-Dimensional, Time-Dependent, Incompressible Flows by a Finite Element Method," *Lawrence Livermore Laboratory Report UCRL-85226*.
- (14) Lee, S., 2000, "A Numerical Study of the Unsteady Wake Behind a Sphere in a Uniform Flow at Moderate Reynolds Numbers," *Computers & Fluids, Int. J.*, Vol. 9, No. 6, pp. 639~667.
- (15) Franke, R., Rodi, W. and Schonung, B., 1990, "Numerical Calculation of Laminar Vortex Shedding Flow Past Cylinders," *Int. J. Wind Eng. & Ind. Aerodyn.*, Vol. 35, pp. 237~257.
- (16) Johnson, T. A and Patel, V. C., 1999, "Flow Past a Sphere up to a Reynolds Number of 300," *J. Fluid Mech.*, Vol. 378, pp. 19~79.