

지면판위 복수장애물 주위 유동장의 가시화 (Ⅱ)

강성환 · 김계현 · 이동환
항공우주공학과

〈要 約〉

地面板위에 모양이 서로 다른 복수 장애물을 바람방향과 평행으로 배열한 후(Tandem Arrangement) 액체4염화 티타늄을 관찰대상 표면에 직접 도색하여 2차원 및 3차원 유동장을 효과적으로 可視化 하였다. 유동장의 動的特性, 즉 박리영역의 양상, 방출 후류의 모양이 구조물의 배치모양과 구조물 사이의 간격에 크게 영향을 받고, 特히 박리영역 내부의 역류가 확인 되었다.

Flow Visualization of Flow Field around Multi-Bluff Bodies on a Ground Plane (Ⅱ)

Sung-Hwan Kang, Kyeo-Hyon Kim, Dong-Hwan Lee
Dept. of Aerospace Engineering, University of Ulsan

〈Abstract〉

Flow patterns around two-bluff cylinders in the tandem arrangements on a ground plane are effectively visualized using liquid titanium tetrachloride.

As results, it was observed that the form of seperated lines on the ground plane and the shedding of vortices from two cylinders were varied with both the gap width and a pair of different cylinders.

기호설명

D_1, D_2	: 원기둥의 직경, 사각기둥 단면 한번의 길이
H	: 가시화 시약 도색 위치
L	: 기둥 높이
Re	: 레이놀즈 수 ($= V_0 \cdot D / \nu$)
T	: 기둥 중심과 중심 사이의 거리
V_0	: 바람 속도 (m / s)
W	: 무차원화 시킨 틈사이의 폭 [$= 2T / (D_1 + D_2)$]
ν	: 동점성 계수

1. 序 論

流動可視化의 主된 目的은 流動場을 눈으로 직접 확인하여 유동 그 자체뿐만 아니라 物理的 現象까지 理解하는 데 있다. 오늘날 선진 여러나라에서는 電算流體力學 分野에서 Super-Computer를 사용하여 完全 運動方程式을 解析하여 그 결과를 可視化하여 실재와 거의 一致하는 成果를 얻고 있다.¹⁾ 이와는 달리 Super-Computer를 자유자재로 사용할 수 없는 여건 속에서 손 쉽고 경제적인 可視化 實驗法 개발 또한 數値解析 못지 않는 의미를 가진다고 생각된다.

지금까지 많은 可視化 手法이 개발 응용되고 있으나²⁾ 유동장의 특성과 관찰 대상에 따라 적절한 수법이 선택되어야 한다. 筆者는 문헌3에서 액체4염화티타늄을 사용하는 Vortex Tagging법⁴⁾을 이용, 시약을 관찰 대상 표면에 직접 도색하여 어느 정도의 成果를 얻었다.

이 직접도색법은 전체 유동장 뿐만 아니라 복잡한 유동장의 필요한 일부분만 가시화 하는 데도 적절했으며, 특히 시간에 따라 변화가 심한 비정상 유동장에 효과적이었다.

지금까지 단일 구조물 주위 유동장에 관해서는 많은 연구결과가 발표되었고⁵⁾ 최근에는

복수 장애물에 관한 연구도 활발하다.⁶⁾ 문헌 6에서는 같은 두 개의 球에 대한 연구결과로 공기역학적 특성을 지적하고 있다.

본 실험에서는 모양이 서로 다른, 길이가 일정한 두개의 기둥을 바람 방향과 평행하게 배열하여 지면판과 모형표면의 필요한 부분에 가시화 시약을 도색하였다. 액체4염화 티타늄(TiCl₄)은 실험중 특별한 장치없이 진한 백색연기를 발생하며 관찰대상 표면에서 박리와류(Seperated Vortex)와 동시에 방출되어 動的 特性을 포착하기가 쉽다. 단지 도색 표면이 응고하여 표면조도가 커지며 급속제 장비의 부식과 人體에 해로운 有毒性 가스를 각별히 注意해야한다.

유동장은 비디오 카메라로 연속 촬영한 후, 현장에서 재생시켜 결과의 양호함을 확인하면서 실험을 진행하였다.

본 실험의 주요 관찰대상은 모양이 서로 다른 장애물이 한 장애물의 후류속에 놓여져 있을 때 전체 후류는 어떤 양상일까 또 장애물과 장애물 사이의 유동장의 변화와 지면판위 경계층 내부의 박리영역의 변화를 확인하는 것이다.

이 분야의 연구 결과는 현재 거의 찾아볼 수 없으며 정량적 측정에 앞서서 가시화 실험을 통한 기초연구의 한 분야로 정성적 분석을 하고자 한다.

2. 實驗裝置 및 方法

실험에 사용한 풍동은 본 대학이 소유하

고 있는 시험부 단면적 $450 \times 600\text{mm}$ 의 개방형이며, 그림1과 같이 시험부 앞부분에 지면판을 설치하였다.

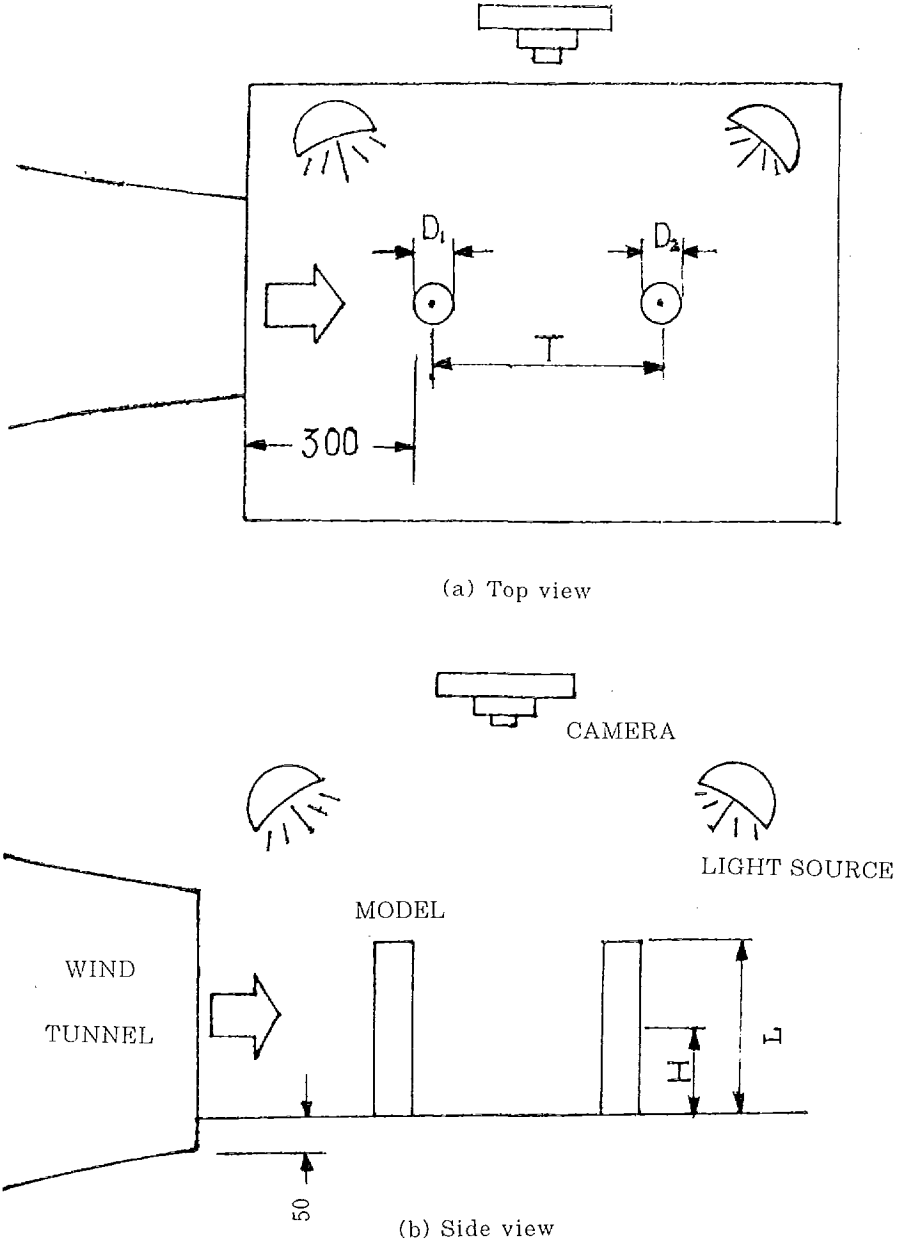


Fig 1. Schematic diagram of location of models and camera

지면판은 경계층 두께를 줄이고 균등한 유속을 얻기위해 앞면에 Sharp edge를 부착한 두께 10mm의 유리판을 사용하였다.

모델은 길이 400mm, 직경이 34mm, 58mm인 두개의 원기둥과 단면적 34×34mm인 사각기둥 한개를 그림1과 같이 배열하였다.

표면이 매끈한 PVC관을 절단하여 유리판 위에 바로 세우고 이동하기도 편하기 위하여 내부에 모래를 채우고 밀봉하였다.

모델 중심간의 거리를 T, 모델사이의 틈폭을 W로 하여 두 모델 직경의 합으로 다음과 같이 무차원화 시켰다.

$$W = 2T / (D_1 + D_2)$$

D_1, D_2 는 두 모델의 각각 직경이며, $W=1$ 일때 두 모델은 서로 접촉하여 틈은 없어진다.

또 가시화 시약 도색 위치의 높이 H를 모델의 길이 L로 나타내며, 지면판위는 $H=0$, 모델의 중간 높이에서는 $H=0.5L$ 이 된다. 어느 위치에서나 도색이 가능하지만 2차원 유동장 가시화에는 $H=0.5L$, 3차원 유동장 가시화에는 $H=0$ 의 위치가 선정되었다.

풍속은 촬영장비와 조명장치의 성능에 의해 크기가 좌우되지만 문헌3에서 풍속에 의한 변화를 포착하기가 쉽지 않았고, 모델 내부에 모래를 채워 고정시켰기 때문에 넘어지는 것을 방지하기 위해서도 풍속을 0.6m/s로 고정시켰다.

이때 풍속, 두 모델 직경의 합으로 계산한 Reynolds수는 1200~4500사이 였다.

실험방법 및 $TiCl_4$ 에 대한 설명은 문헌3에서 상세히 취급하였으므로 본 논문에서는 생략하기로 한다.

3. 攝影裝備 및 照明裝置

조명등으로 500W Flood Lamp 2개를 그림1과 같이 이동이 용이하게 설치하였고

지면판위 조명시 조명등의 발열로 인한 영향을 문헌3에서 확인되었기 때문에, $H=0$ 에서의 유동장은 짧은 시간내에 촬영을 끝내도록 하였다. 연속사진은 32frame/s 촬영 가능한 비디오 카메라(NV-M5, Panasonic제품)를 이용하였고 현장에서 재생 모니터를 통해 촬영의 양·불량을 확인하였다.

논문에 게재할 스틸 사진은 재생 모니터의 정지화면을 간접 촬영하여 사용하였다.

본 논문에 게재된 전부의 사진은 유동장의 한 순간을 포착한 정지 화면으로 시간에 따른 변화를 이해하기 위해서는 전부의 화면을 게재해야 하지만, 지면수가 제한되어 유동장 분석은 재생모니터를 이용하고 본 논문에는 참고자료로써 몇장의 정지 화면을 게재함을 미리 지적해 둔다.

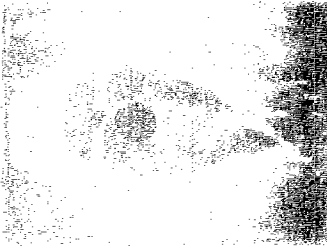
가시화 실험 결과를 정확히 전달하는 방법은 영화 상영이나 비디오 상영외의 적절한 수법은 아직 발견 되지 않고 있다.

4. 실험결과

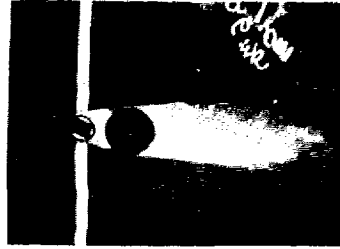
지면판 효과를 확인하기 위한 3차원유동장은 $H=0$ 에서, 박리와류(Vortex)의 2차원 방출 양상은 $H=0.5L$ 에서 얻었다. 전방 장애물 위치에서 지면판위 경계층 두께는 약 10mm로 비교적 큰 값이었고, 바람 속도는 0.6m/s로 고정시켰다. 문헌3에서 외풍의 영향이 의외로 컸음을 확인하고 가능한 영향을 줄이도록 노력하였다.

그림2(a)-(d)는 직경이 서로 다른 두 원기둥의 배열이며 직경이 작은 것이 상류에 위치한다.

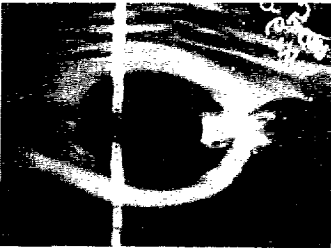
장애물 주위의 타원형의 검은 부분이 박리영역으로 말굽형 와(Horse Shoe Vortex)또는 목걸이형 와(Necklace Vortex)로 불리워지는 와의 존재영역이다. 흰 연기와외의 경계선이 박리선(Separated line)으로 지면판위의 장애물의 유동장의 특징을 알 수 있다.



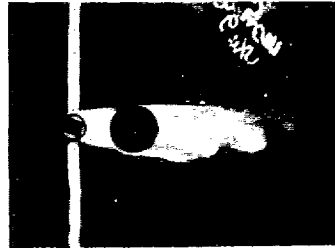
(a) $W=1.11$



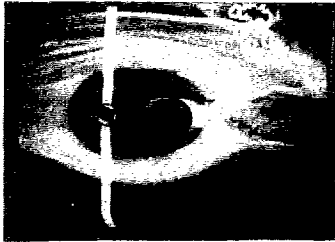
(e) $W=1.11$



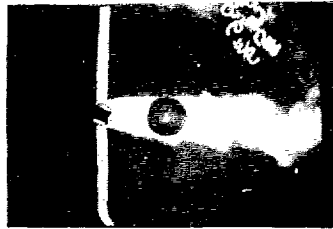
(b) $W=1.77$



(f) $W=1.77$



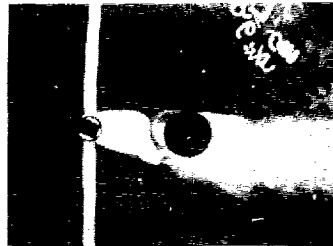
(c) $W=2.09$



(g) $W=2.09$



(d) $W=2.52$



(h) $W=2.52$

Fig 2. Flow visulaization around two circular cylinders with various gap-width
 (The larger diameter cylinder is at downstream, $V_0=0.6\text{m/s}$, $Re=3345$)
 (a)-(d) Separated lines on the ground plane, $H=0$
 (e)-(h) Vortex sheddings, $H=0.5L$

(a)와 같이 두 장애물이 아주 접근 했을 때 박리영역은 작은 원기둥 직경의 약 8배 정도 하류로 길게 뻗는 타원형을 형성하며 하류쪽 직경이 큰 원기둥 후방으로 약간의 역류(Reversed Flow)가 보인다.

간격의 폭(W)이 넓어져 하류쪽 장애물이 박리영역의 하류쪽 경계에 가까워지면 (c)와 같이 박리영역은 좁아지고 하류쪽 장애물 후방을 향한 역류가 활발해진다. 이 역류는 좌우 교대로 요동하면서 큰 원기둥 후방으로 접근 수직 상승한 후 다시 하류로 방출 된다.

이는 물고기 꼬리 지느르미 운동과 흡사하여 카르만 와(Karman Vortex)가 역류하여 수직 상승한 후 다시 카르만 와의 형으로 방출되는 양상을 보였고 이 방출 양상이 Tandem배열의 특징으로 보인다. (d)와 같이 간격이 더욱 넓어지면 박리영역도 다시 넓어지며 역류도 여전히 발생함이 관찰되었다.

(e)-(h)는 $H=0.5L$ 에서의 박리와류(Seperated Vortex)의 2차원적 방출 양상을 보여주고 있는 데, (e), (f)와 같이 장애물사이가 근접해 있으면 방출와류는 아치형 와(Arch Vortex)가 주이며 더 하류쪽에 약한 카르만 와가 보인다. 또(g)(h)에서 두 장애물 사이는 아치형 와, 후방 장애물 하류는 카르만 와가 보인다. 특히(h)와 같이 주위조건, 즉 외풍등에 민감하여 전방 원기둥 후류가 어느 한 방향에서만 방출되는 특이한 경향을 보이고 있다. 이는, 직경이 작은 원기둥이 큰 원기둥 전방에 위치할 때만 관찰되었다. 이 불안정한 유동장에 대해서는 좀더 세밀한 분석이 요구된다.

그림3(a)-(c)는 그림2와 반대로 직경이 큰 원기둥이 상류에 위치한다.

장애물 사이 간격이 좁을 때 (a), (b)와 같이 하류쪽으로 긴 타원형 박리영역을 형성하며 역류가 박리영역 내부로 진출은 하지만 그림2와는 달리 후방 원기둥까지 도달하지 못한다. (c)에서 이 역류가 후방 원기

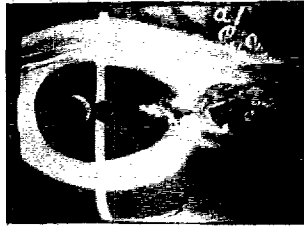
둥까지 도달하고 (d)에서 전방 원기둥까지, 즉 장애물과 장애물 사이 간격까지 진출하고 박리영역은 좁아진 감이 있다. 두 원기둥사이 간격까지 진출한 역류는 복잡한 양상으로 상승 후 카르만 와의 형태로 방출된다.

(c)-1-(c)-3은 역류가 발생후 장애물 사이 간격까지 진출하는 과정을 시간차이를 두고 배열한 사진이다. 그림2와는 달리 역류가 전방 원기둥까지 진출한다는 것은 큰 원기둥 후방이 조금더 저압 영역임을 예상할 수가 있다.

그림4는 그림3의 배열에서 전방 원기둥 $H=0.5L$ 위치에 시약을 도색 방출와류의 2차원 특징을 보여주고 있다. W가 2.5이하에서는 작은 원기둥이 큰 원기둥 후류에 완전히 파묻혀 큰 영향 받지 못하리라 예상했지만 방출와류는 카르만 형이 억제되고 대부분이 아치형에 가까운 형상이다. 후방 원기둥 하류에는 카르만 형이 보이나 규모가 작은 편이었고, W가 2.5이상에서는 하류의 카르만 와의 성장을 촉진하고 규모도 커진다. 두 원기둥 사이는 여전히 아치형 와의 형상을 하고 있다.

그림5(a)-(e)는 전방에 원기둥 후방에 단면의 한번의 길이가 원기둥 직경과 같은 사각기둥을 배치했을 때 지면판위의 유동장이다. (a)-(d)에서는 간격폭이 무관하게 박리영역의 크기에 큰변화없이 원기둥 직경의 4~5배의 원형모양에 가깝고 그림2와 비교하여 박리영역이 좁아진 것을 알수 있다. 또 사각기둥을 향한 역류가 쉽게 전방 원기둥까지 진출하는 것이 이 배열의 특징이다. 전방원기둥까지 진출한 역류는 좌우로 심한 요동을 반복하는 카르만 와의 형상으로 하류로 방출되며 W가 너무 커지면 (e)와 같이 역류도 발생치 않고 박리규모도 타원형으로 규모가 커진다.

(f)-(i)는 전방원기둥 후류의 폭이 좁고 사각기둥을 통과 하면서 좌우 요동이 심한 카르만 와로 성장하여 하류로 방출된다.



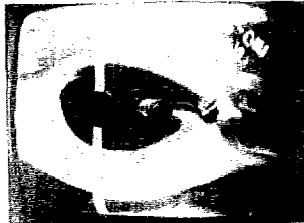
(a) $W=1.22$



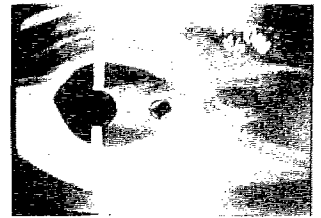
(b) $W=1.43$



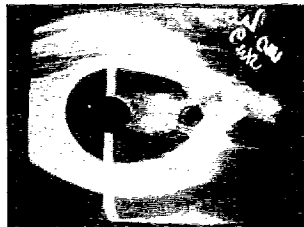
(c)-1



(c)-2 $W=1.77$



(c)-3

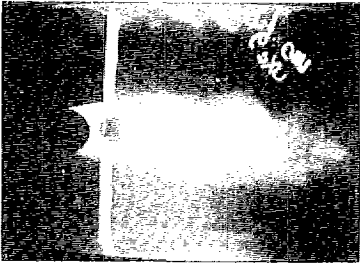


(d) $W=2.52$

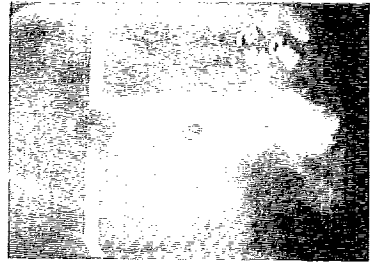


(e) $W=3.17$

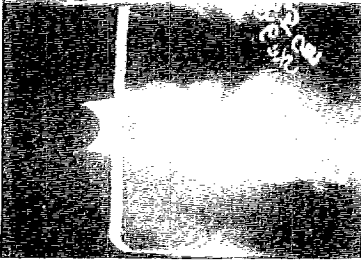
Fig 3. Separated lines on the ground plane(The larger diameter cylinder is at upstream, $V_0=0.6\text{m/s}$, $Re=3345$)



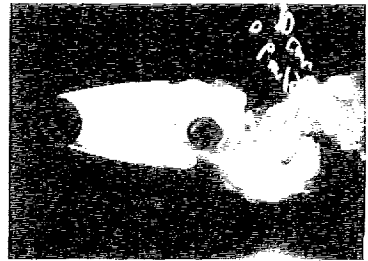
(a) $W=1.11$



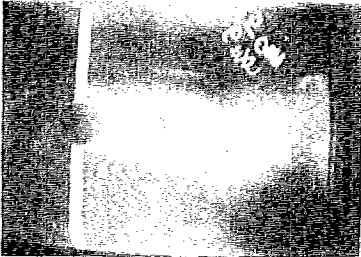
(d) $W=2.52$



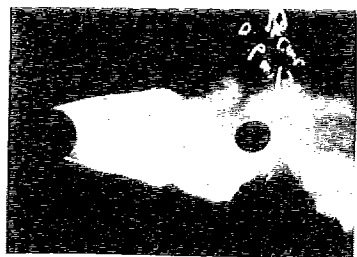
(b) $W=1.77$



(e) $W=3.17$

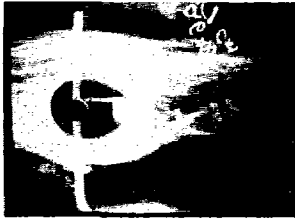


(c) $W=2.09$

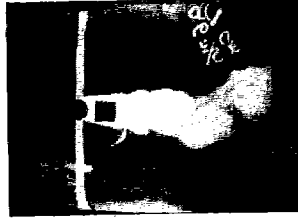


(f) $W=3.61$

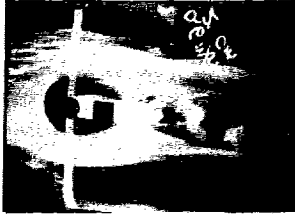
Fig 4. Vortex sheddings with the same conditions for Fig.3



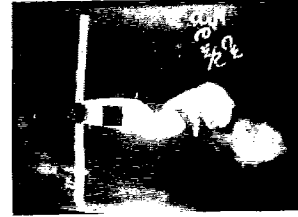
(a) $W=1.29$



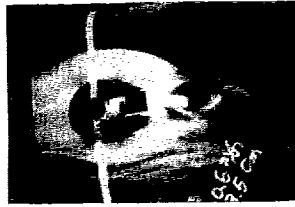
(f) $W=1.29$



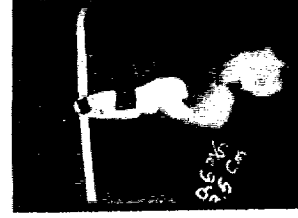
(b) $W=1.59$



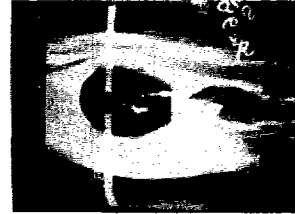
(g) $W=1.59$



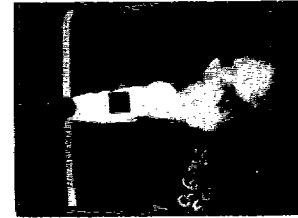
(c) $W=2.03$



(h) $W=2.03$



(d) $W=2.52$

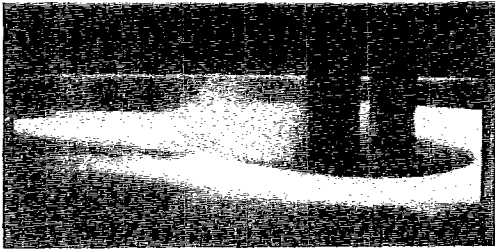


(i) $W=2.52$

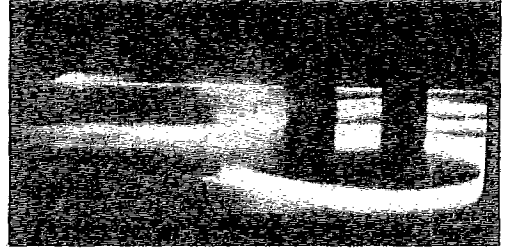


(e) $W=3.94$

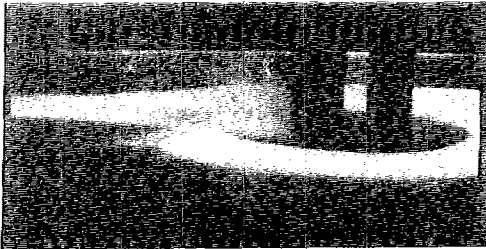
Fig 5. Flow visualization around a square and a circular cylinder. ($V_0=0.6\text{m/s}$, $Re=2472$)
 (a)-(e) Separated lines on the ground plane, $H=0$
 (f)-(i) Vortex sheddings, $H=0.5L$



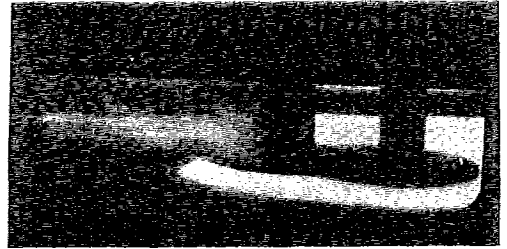
(j) W=1.29



(l) W=2.03



(k) W=1.59



(m) W=2.52

Continued : Side view of Fig.5 (a)-(d)

(j) - (m)은 (a) - (d)를 측면 위쪽에서 내려다 본 사진이며 박리선의 특징과 역류가 후방사각 기둥을 따라 상승후 방출됨을 알 수 있다. 이 측면도를 통해서 (a) - (d)가 3차원 유동장임을 확인할 수 있다.

사각기둥과 같이 박리점 위치가 확실하며 전방부에 존재하여 후류의 폭이 큰 장애물일수록 카르만 와의 규모가 크고 활발하다. 이는 그림6에서도 확인할 수 있다.

그림6은 사각기둥이 전방, 원기둥이 후방에 위치 그림5와 반대되는 배열이다. 그림5와 비교하면 박리영역은 대략원형이며 크기도 비슷한 것으로 보인다. (a)와 같이 두기둥이 아주 근접했을 때 부터 역류가 발생하여 전방 사각기둥까지 진출한 후에 카르

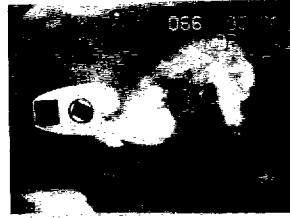
만 형으로 하류로 방출되지만 그 규모는 그림6이 더 크게 보인다.

(e)와 같이 간격이 아주 넓어져 있을 때 도 그림5와 유사한 유동장을 형성하고 있다.

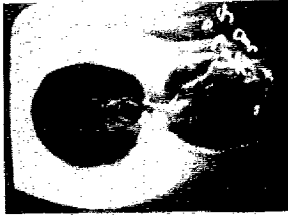
(f)-(j)에서는 간격이 좁을 때 좌우운동이 아주 심한 카르만 와의 형으로 방출되다가 간격이 커지면서 요동은 작아지고 후류의 폭은 넓어졌다. 두 장애물 사이는 아치형, 후방 장애물을 통과하면서 카르만 형으로 방출되는 것은 그림5와 유사하나 그 규모가 훨씬 크다. 이는 사각기둥이 전면에서 박리하기가 쉽고 따라서 후류의 폭도 넓어지는 대표적인 Blunt Body이기 때문으로 추측된다.



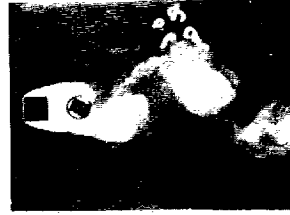
(a) $W=1.19$



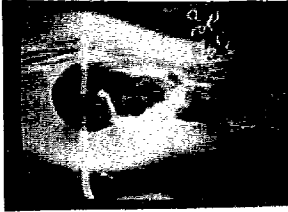
(f) $W=1.29$



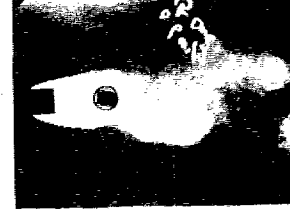
(b) $W=1.59$



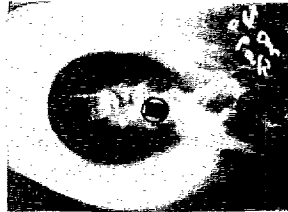
(g) $W=1.59$



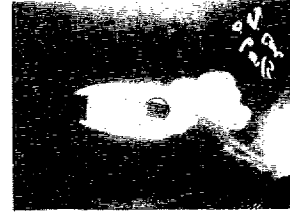
(c) $W=2.52$



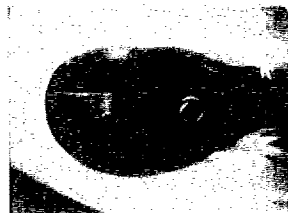
(h) $W=2.52$



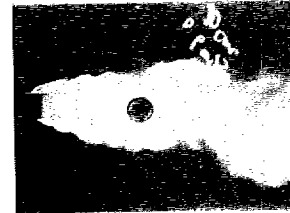
(d) $W=3.06$



(i) $W=3.06$



(e) $W=3.94$

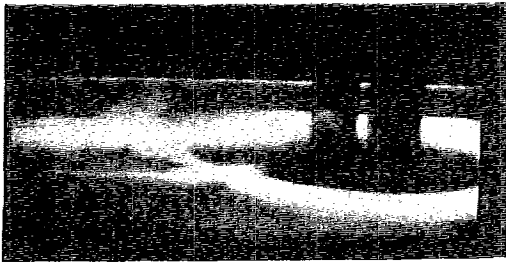
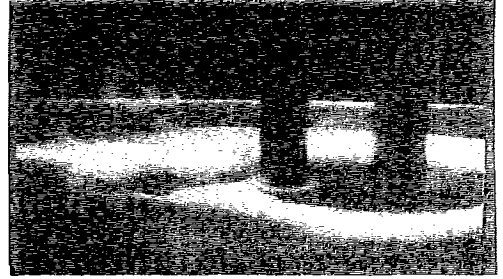
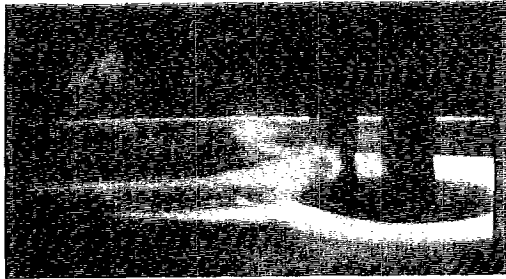
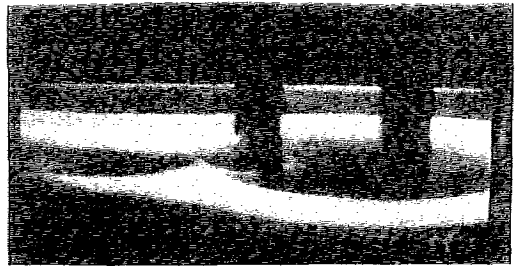


(j) $W=3.94$

Fig 6. Flow visualisation around a square and a circular cylinder (A square cylinder is at upstream, $V_0=0.6\text{m/s}$, $Re=2472$)

(a)-(e) Separated lines on the ground plane, $H=0$

(f)-(j) Vortex sheddings, $H=0.5L$

(k) $W=1.29$ (m) $W=2.52$ (l) $W=1.59$ (n) $W=3.06$

Continued : Side views of Fig.6 (a)-(d)

(k) - (m)은 (a) - (d)의 유동장 특징을 이해하기 위해 측면 위쪽에서 내려다 본 사진이다. 박리선의 특징과 역류가 상승 후 방출됨을 알 수 있다. 그림 5 에서와 같이 (a) - (d) 유동장이 3차원 유동장임을 알 수 있고 박리선이 경계층 내부에 존재하다가 후방장애물 하류에서 역류로 경계층을 이탈함을 알 수 있다. 경계층과 박리층과의 관련에 대해서는 더 정확한 정량적 측정이 요구된다.

그림 7(a)(b)는 전방에 사각기둥 후방에 원기둥의 경우, 즉 그림 6(c)의 배열에서 후방 원기둥 하류부분에 $H=0.2L$ 에 가시화 시약을 도색한 후 발생한 3차원 유동장의 측면 사진이다. (a), (b)사이 경과시간은 약

1.3초이며 원기둥 하류 뒷부분에서 발생한 흐름이 일부는 벽을 타고 상승, 일부는 원기둥 아랫부분을 역류하여 통과 전방 사각기둥까지 진출하여 복잡한 유동장을 형성한다. 두 기둥사이의 복잡한 소용돌이는 일부는 상승 후 후방 장애물 좌우로 카르만 와의 형태로 방출되고, 일부는 간격 내부에서 회전 운동하는 복잡한 비정상 유동장이다.

그림 8(a)(b)는 그림 7과 같은 측면 사진이나 연기의 발생점이 전방 장애물 하류쪽 면 $H=0.3L$ 에 위치한다.

이 간격 내부의 유동장은 바람 방향과 수직으로 상승·하강 및 회전하는 2차류(Secondary flow)의 특성을 이해 하는데 도움이 되었다.

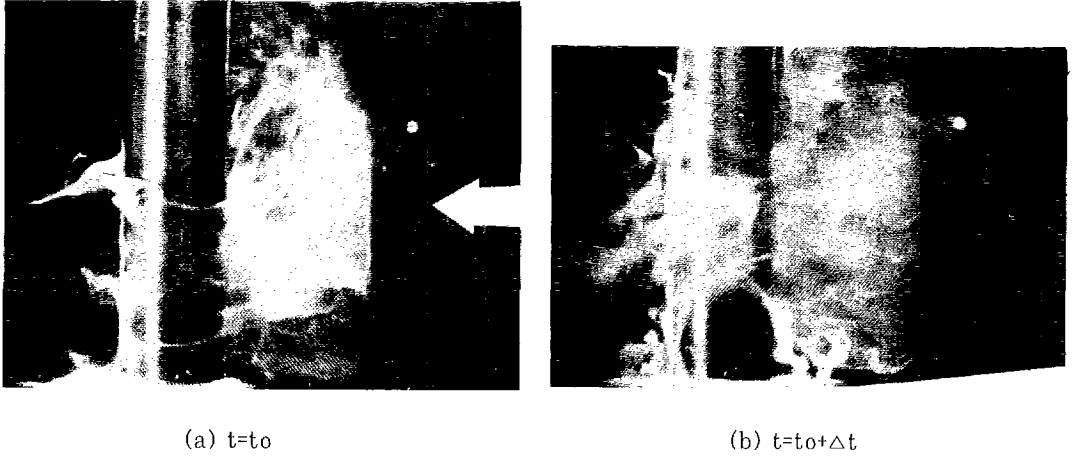


Fig 7. Side views of unsteady gap flow pattern between a square cylinder and a circular one. ($V_0=0.6\text{m/s}$, $Re=2472$, $\Delta t=1.3\text{s}$, $W=2.52$) Smoke is generated at $H=0.2L$, on the rear surface of circular cylinder located at down stream.

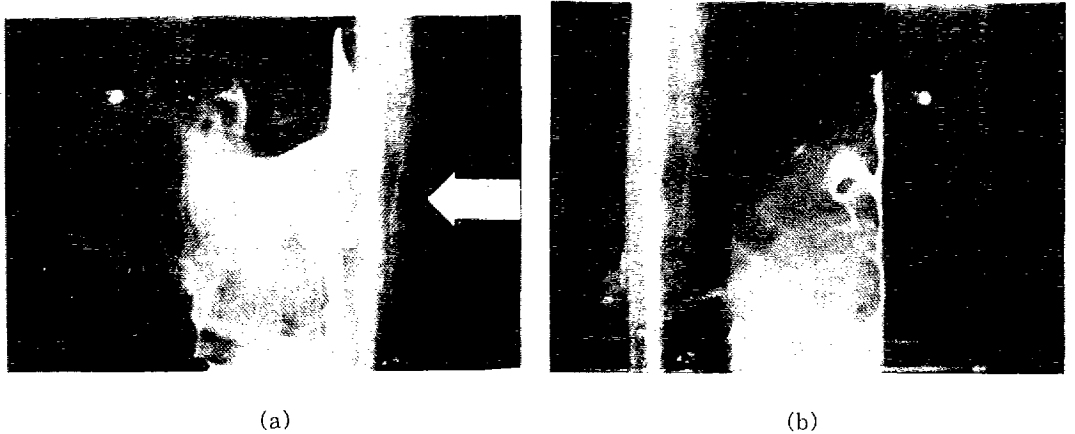


Fig 8. Side views of gap flow pattern between a circular cylinder and a square one. Smoke is generated at $H=0.3L$, on the rear surface of the cylinder located at upstream. ($V_0=0.6\text{m/s}$, $Re=2472$, $W=2.52$)
 (a) circular cylinder is at upstream.
 (b) square cylinder is at upstream.

(a)는 전방에 원기둥, 후방에 사각기둥의 배열이며 흐름은 하강후 소용돌이를 일으키며 상승하는 순간을 포착한 것이다.

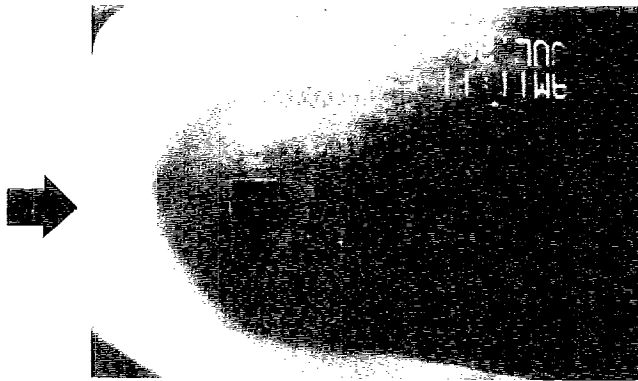
(b)는 (a)와는 반대배열로 사각기둥이 전방에 위치할 경우이며 (a)보다는 더욱 복잡한 유동장을 나타내며 상승·하강이 동시에 발생하는 순간을 포착한 화면으로 2차유동의 특징을 확인하는 데 도움이 되었다.

이런 복잡한 비 정상 유동장을 한 순간의 정지 화면으로 이해하는 데는 무리가 따르며 연속적 움직임을 분석하기 위해서는 모니터를 직접 관찰하는 수법의 다른 수법

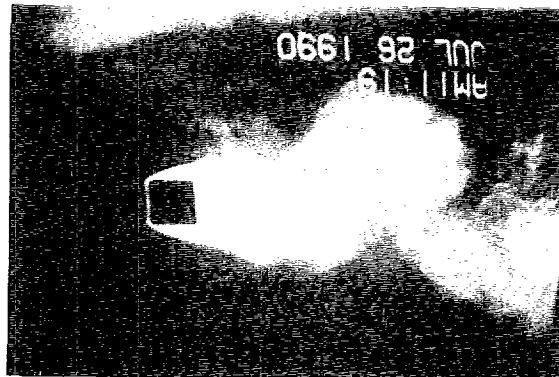
을 현재 찾을 수 없다. 복수 카메라로 평면·측면을 동시 촬영하는 수법이 앞으로 요구되리라 예상된다.

그림9(a)(b)는 유동장 특징이 가장 뚜렷한 단일 사각기둥에 대한 박리영역과 박리 와류의 방출양상을 보여주고 있다. 복수 배열보다 박리영역은 넓어진것으로 보이며 카르만 와의 규모도 크게보이나 발생빈도는 줄어진 것으로 보인다.

차후 방출와류의 진동수 변화에 대한 정량적 측정이 요구된다.



(a) $H=0$



(b) $H=0.5L$

Fig 9. Flow visualization around a single square cylinder
 (a) circular cylinder is at upstream.
 (b) square cylinder is at upstream.

5. 결 론

본 실험은 문헌3의 결과와 경험을 토대로 두 장애물이 바랍부는 방향과 평행하게 배열되었을 때, 가시화 시약의 직접 도색법을 이용하여 장애물 주위의 유동장을 가시화시켰다. 문헌3의 수직배열에 비해서 시약의 도색 기술이 능숙해졌고 장애물의 배열이 측면 사진 촬영에 적합 했으며, 개방형 풍동에서 외풍의 영향을 고려하면서 실험을 했으나 실내 기류 유속을 완전히 정지상태로 유지하는 것이 어려웠다.

또 유리판 전면에 Sharp edge를 부착했지만 모델 설치 위치에서 경계층 두께가 약 10mm정도로 상당히 큰 값이었다. 급후 개방형 풍동의 시험부를 밀폐형으로 개선할 것과 경계층 두께를 줄이도록 지면판 설치에 주의를 기울일 점을 지적하면서 본 실험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 박리영역 하류에서 역류가 발생한 후 장애물 사이의 간격 내부까지 진출, 카르만 와의 형태로 하류로 방출된다.

2) 이 역류는 장애물 사이의 무차원화 된 폭이 3.5이상에서는 발생하지 않았다.

3) 작은 원기둥이 상류측, 큰 원기둥이 하류측에 배열 되었을 때 역류는 두 원기둥 사이 간격 내부까지 진출하지 못했다.

4) 방출와류의 특징은 두 장애물 사이에서는 아치형, 후방 장애물 하류에 서는 카르만 형이었다.

5) 측면 사진으로 부터 장애물 사이 간격 내부에서 상승, 하강하는 2차류와 복잡한 소용돌이가 관찰되었다.

본 실험과 같이 시간에 따른 변동이 아주 심한 비 정상 3차원 유동장을 정확히 포착하기 위해서는, 복수 카메라를 사용 평면, 측면을 동시에 촬영하여 동일 화면에 동시에 표현하는 화면처리 기법등의 개선이 필요하며, 아울러 정량적 측정이 병행되어야 효과적임을 실감하였다.

급후 측정장비 및 촬영·조명 수법의 개선이 이루어 지는 대로 정량적 분석을 시행하고자 하는 데 본 논문의 결과가 다소의 길잡이가 되리라 믿는다.

참고문헌

- 1) Kunio Kuwahara. "Flow Simulation on Super Computer and Its Visualization" 유동해석 기술응용에 관한 심포지움, 창원, KIMM, April 3-4, 1991, pp.3-4
- 2) 淺沼 強, "流れの可視化ハンドブック", 朝倉書店, 1978
- 3) 송 창수, 강 경욱, 이 동환 "지면관위 복수 장애물 주위 유동장의 가시화(I)"-울산대 공학연구논문집 22권 2호, pp. 1-13, 1991.
- 4) P. Fremuth, W.Bank, M.Palmer "Use of Titanium Tetrachloride for Visualization of Accelerating Flow Around Airfoils", Proceeding of the 3rd Intl. Symp. on Flow Visualization, Ann Arbor, USA, Sept.6-9, 1983, pp. 99-105
- 5) Y.Ohya, A.Okajima, M.Hayshi, "Wake interference and Vortex Shedding", Encyclopedia of Fluid Mechanics, Vol.8-1, 1989. Gulf publishing Company, pp. 324-389
- 6) S.Okamoto, K.Matsunaga, "Experimental Study of Flow past Two Sphere in Oblique Arrangement placed on plane Boundary", Trans. Japan Soc. Aeronaut. Space Sci., Vol.33, No. 102, 1991, pp.234-246