

지면판위 복수 장애물 주위 유동장의 가시화(I)

강경욱 · 송창수 · 이동환
기계공학과

〈要 約〉

地面板위에 모양이 서로 다른 복수 장애물을 바람의 방향과 수직으로 배열(Side-by Side) 하여 액체4염화 티타늄을 관찰대상 표면에 직접 도색하여 유동장을 효과적으로 가시화 하였다. 장애물 사이의 간격이 좁아지면 틈을 통과하는 흐름은 어느 한쪽으로 傾斜진다는 특징이 (Biased Flow) 확인되었고, 지면판위 박리선, Necklace Vortex, 후류등 3차원 유동장 특징이 확인되었다.

Flow Visualization of Flow Field around Multi-Bluff Bodies on a ground Plane (I)

Kang, Kyong-Uk · Song, Chang-Su · Lee, Dong-Hwan
Dept. of Mechanical Engineering, University of Ulsan

〈Abstract〉

Flow patterns around two-bluff bodies in side-by-side arrangements on the ground plane are easily visualized using liquid titanium tetrachloride.

In two-dimensional flow field, the gap flow between two-bodies became biased to one side for closer spacing. Three-dimensional flow patterns, which have seperated regions, necklace vortices and other dynamic seperations, are dependant on the bluff-body shape and the gap-space ratio.

기호설명

D_1, D_2 ;	원기둥 직경, 사각기둥 단면 한변의 길이
H ;	가시화 시약 도색 위치
L ;	기둥 높이
Re ;	레이놀즈 수 ($=U_0 D/\nu$)
T ;	기둥 중심과 중심사이 거리
U_0 ;	바람속도 (m/s)
W ;	무차원화시킨 틈사이 폭 ($=2T/(D_1+D_2)$)
ν ;	동점성 계수

1. 序 論

자연현상중에서 流動상태를 직접 눈으로 확인할 수 있다면 유동 그자체 뿐만아니라 그 現象의 物理的 의미까지 理解하는 데 많은 도움이 될 것이다.

이를 위하여 비교적 손쉽고 경제적인 流動 可視化 수법은 理·工學 및 의학등 넓은 분야에서 많은 연구자와 기술자에 의해서 기술이 개발되고 새로운 분야에 응용되고 있다. 가시화 수법에도 많은 방법이 사용되고 있으나 流體의 종류, 관찰대상에 따라 적절한 수법이 선택되어야 하는 데 본 논문에서는 액체4염화 티타늄($TiCl_4$)를 사용하는 Vortex tagging 法¹⁾을 이용하기로 했다.

이 방법은 加速되는 흐름속의 翼型주위 유동장 가시화에 성공하였으며^{2, 3)} 非正常 운동이나 3차원 유동장 가시화에 적절한 수법으로 알려지고 있다. 지면판위에 서있는 복수 장애물 주위 유동장은 지면판과 장애물과의 간섭으로 복잡한 3차원 유동장을 만들며 전체 유동장뿐만 아니라 필요한 일부분의 유동장도 임의로 가시화하기에 적절한 방법이며 문헌²⁾과 같은 注入法이 아니고 새로운 塗色法을 考案하여 活用하였다.

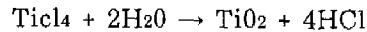
복수 장애물 주위의 유동장은 단일 장애물의 그것과 유사하리라고 통상 예상하지만 장애물사이의 간격이 좁아지면 각각의 후류(Wake)의 간섭으로 完全히 다른 새로운

유동장을 형성한다고 지적하고 있는 데⁴⁾ 이러한 유동현상은 열교환기 내부관의 진동, 고층건물이 밀집한 都心地, 다수의 철탑이나 해양구조물이 운집한 곳에서 강한 바람에 의해 발생하는 많은 공학적 문제들이 이와 깊은 관계를 가진다. 따라서 이러한 복수 장애물 주위 유동장에 대한 상세한 연구분석이 필요하며 定量的 特性, 즉 양력, 항력, 모멘트등의 측정에 앞서 유동장의 定性的 분석을 위해 可視化 실험이 필요하다. 2차원 유동장에 대한 연구 결과는 다수 발표되어 있으며^{3, 4)} 유익한 사진을 입수하기가 어렵지 않으나 3차원 유동장에 관한 연구실적은 드물고 단편적²⁾ 내용뿐이므로 기초연구의 한 분야로서 본 실험을 실시하게 되었다.

본 실험에서는 모양이 서로 다른 두 기둥을 지면판위에 바람이 부는 방향과 수직으로 배열하여 두 기둥 사이의 간격을 변화시키면서 그때 유동장의 평면 및 측면 사진을 연속적으로 촬영하고자 한다.

2. 가시화방법

액체4염화 티타늄은 융점-24.1℃, 비등점 136.4℃, 비중 1.76의 無色, 無臭溶液으로 습기찬 공기속에서 加水分解하여



이 된다. 2) TiO_2 의 연기는 극히 진하여 高速氣流(약 30m/s)에서도 사용가능한 것으로 알려지고 있으나 가수분해후 곧 바로 凝固되어 고체상태로 변하기 때문에 취급하기가 번거롭다. 문헌²⁾에서는 가는 流管을 통해서 용액을 기류속에 주입하고 있으나 기류와 접촉후 판의 출구를 막아버려 균등한 용액주입이 불가능 하기 때문에 본 실험에서는 가는 붓을 이용하여 관찰대상 표면에 직접 도색하는 수법을 채택했다. 이는 용액 주입관이 불필요하여 주입관에 의한 영향이

제거되며 필요한 부분의 가시화를 임의로 선택할 수가 있기 때문이다. 그러나 가수분해후 人體에 有毒한 열소가스에 人體와 실험장비가 직접노출되어 세심한 注意가 요구된다. 노출된 人體는 즉시 비눗물로 철저히 세척해야하며 1회 사용한 붓과 관찰대상 표면도 매회 충분히 세척해야 하는 번거로움이 따른다. 대상표면을 세척하지 않으면 응고물질에 의한 표면조도의 변화에 의한 영향이 커지며, 한번 사용한 붓은 굳어져서 다시 사용할 수가 없어 반드시 세척하지 않으면 안되었으나 다행히 비눗물에 간단히 제거되어 시간의 절약을 가져왔다. 나중엔 동일한 붓을 수십개 준비하여 사용하였다. 이러한 有毒가스에 대한 세심한 주의와 철저히 세척해야하는 번거로움에도 불구하고 이 수법을 채용한 理由는 별도의 장치없이 진한 연기를 얻을 수 있고 필요로 하는 부분의 유동장을 임의로 선택할 수 있어 非常 운동이나 3차원 유동장 가시화에 적절하기 때문이다.

3. 실험장치 및 모델

실험에 사용된 풍동은 본 대학이 보유하고 있는 시험부 단면적 $700 \times 450\text{mm}$ 인 개방형이며, 그림1과 같이 지면판을 설치했다. 지면판은 표면조도를 최대한 줄이기 위해 매끈한 유리판을 사용했고, 지면판 앞부분에 Sharp edge를 부착하여 모델설치 위치에서 경계층 두께가 약 10mm 로 측정되었다.

모델 설치 위치는 균등 유속 분포를 얻을 수 있고 시야를 도색하는 작업공간을 확보하기 위해 풍동입구로부터 약 300mm 하류로 결정했다. 이는 본 실험의 목적이 난류 경계층의 영향보다는 복수 모델의 배열과 모양에 대한 영향을 분석하는 데 두었기 때문이다.

설치 모델은 길이 40mm , 직경이 34mm

원기둥 2개, 직경 58mm 원기둥 1개, 한 변이 34mm 정사각 기둥 1개, 도합 4개의 기둥을 준비하였다.

모델의 배열은 직경이 같은

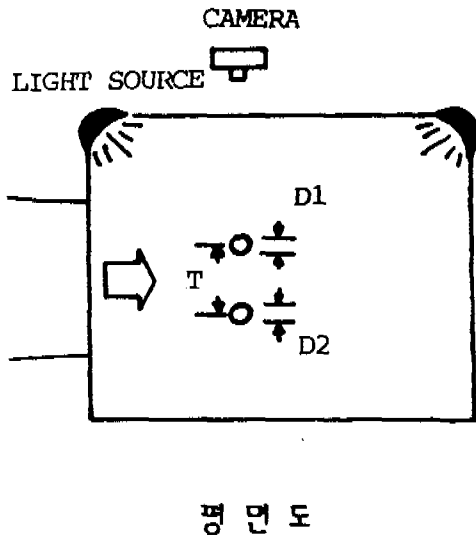
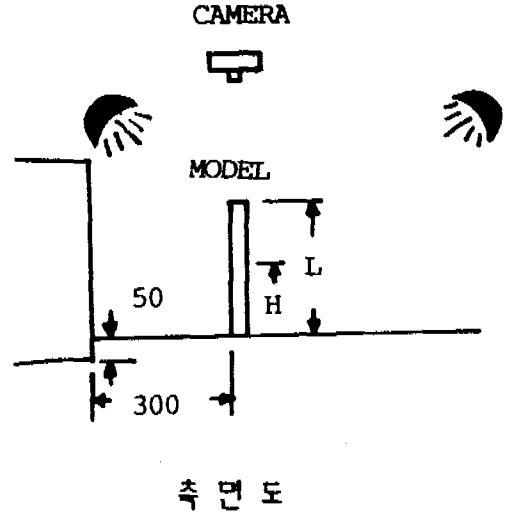


Fig. 1 실험장치 및 모델배치

두 원기둥, 직경이 서로 다른 두 원기둥, 직경이 같은 원기둥과 사각기둥이 각각 2개씩 조합을 이루어 바람방향과 수직(Side-by-Side)으로 배치한다. 두 기둥간의 간격은 기둥 중심과 중심사이 간격을 T 로 하면 간격폭 W 는 다음과 같이 무차원화되며

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

이때 D_1 , D_2 는 두기둥의 직경이며 $W=1$ 일때 두 기둥 사이의 간격은 없어지고 접촉하게 된다.

가시화 시약(TiCl₄)은 기둥의 상류쪽 표면에 도색하지만 필요에 따라 하류쪽 표면에도 도색하며, 기둥의 높이에 따라 도색위치를 바꾸어 가면서 2차원, 3차원 및 후류영역등 필요한 유동장을 임의로 가시화한다. 기둥 길이를 L 로 나타내면 도색위치는 높이에 따라 $H=0, 0.5L$, 즉 지면판위와 기둥 중간 높이를 선택했다.

바람의 속도는 $0.6 \sim 1.1m/s$ 의 범위내로 한정시켰으나 촬영장비의 성능과 조명장치의 개량으로 더 빠른 속도까지 가능하리라 예상되지만 본 실험에서는 많은 시행착오를 거쳐서 위의 범위내로 한정시켰으며 열선유속계(Model 49-7002, Kanomax)로 측정 일정치를 유지하도록 했다. 또 Reynolds 수는 두 기둥의 직경의 합(D_1+D_2), 바람의 속도(U_0)와 동점성계수로 결정된다.

4. 촬영장비 및 조명

조명등으로는 500W의 Flood Lamp 2개를 그림1과 같이 배치하여 촬영위치에 따라 임의로 이동할 수 있도록 설치했다.

촬영장비는 비디오 카메라(VHS, NV-5. 松下電機社 제품)를 사용하고, 재생 모니터와 직접 연결시켜 실험결과 화면을 직접 확인하면서 진행하도록 하였다. 이는 실험현장에서 결과를 곧 바로 확인·분석·토론 할 수 있어 개선점을 찾기 쉽고 촬영 재

생의 반복작업이 가능하였다.

사용된 비디오 카메라는 30.3frame/s을 촬영 할 수 있는 성능을 가지고 있어 인쇄용 스틸 사진은 재생 모니터의 화면을 한 장면씩 재 촬영하여 사용함으로써 시간과 경제적 절약을 얻었고, 조명장치의 부실한 면은 모니터 화면의 밝기를 조정하여 어느 정도 보장되었다.

5. 실험결과

수직배치(Side-by-Side Arrangements)의 가장 큰 특징은 문헌4에서 지적한 바와 같이 장애물 틈사이에 경사류(Biased flow)의 발생이다. 경사류의 특징은 장애물 사이의 틈을 통과하는 흐름이 틈사이 간격이 좁아지면 어느 한 쪽 방향으로 기울어지는 현상이며 이는 장애물 사이의 간격과 장애물의 형상 및 배열의 변화에 큰 영향을 받는다.⁴⁾

본 실험에서는 우선 장애물의 중간 높이($H=0.5L$)에 가시화 시약을 도색하여 2차원 유동장의 특징인 경사류를 확인한 후 지면판과 장애물 밑부분($H=0$)에 도색하여 3차원 유동장의 특징, 박리선, 목걸이형 와류(Necklace Vortices) 등을 확인하고자 한다.

5.1 직경이 같은 두 원기둥

그림2(a)~(b)는 직경 34mm인 원기둥 2개가 지면판위에서 틈사이의 폭을 증가시킬때 발생하는 유동장을 보여주고 있다. W 가 1.16이하에서는 두 원기둥 하류에 규모가 큰 하나의 후류(Wake)를 형성하며 경사류의 존재는 W 가 1.16에서 겨우 확인되었다. W 가 증가하면 경사류의 방향과 후류의 특징이 더욱 확실해지며 W 가 1.42까지는 방향이 한 쪽으로 고정된 안정된 흐름을 보이다가 1.42에서 경사류의 방향이 반대로 바뀌며 1.50까지는 방향이 불규칙하게 바뀌

는 불안정한 흐름을 보인다. W 가 1.50이상에서는 다시 고정된 방향을 보인다. 문헌 4에서 경사류의 방향 변화는 박리점의 이동

에 영향을 받는다고 지적하고 있는데 틱사이 간격과 표면조도와 박리점의 이동과의 관계가 심도 있게 분석될 필요가 있다.

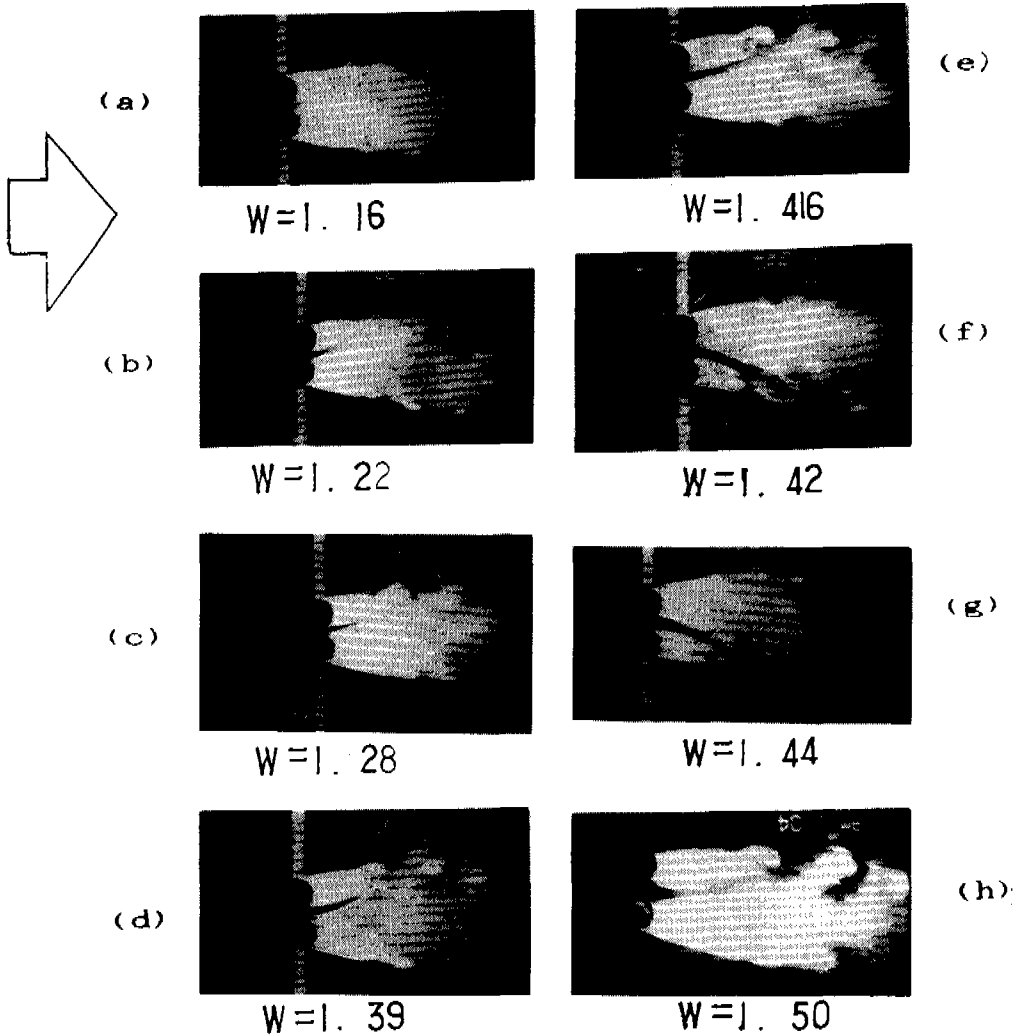


Fig. 2 크기가 같은 두개 원주 주위의 유동
($U_0=1.1\text{m/s}$, $Re=4533$, $H=L/2$)

5.2 직경이 서로 다른 두 원기둥

그림3(a)~(e)는 풍속 0.7m/s 에서의 유동장으로 W 가 1.22이하에서는 경사류의

방향이 일정하지 않고 불규칙하게 변하는 불안정한 유동장이며 W 가 1.54이상에서 직경이 작은 원기둥, 즉 후류폭이 좁은쪽으로 방향이 기울어진다.

(f)~(g)는 풍속을 1m/s로 증가시켰을 때 W가 1.22이하에서는 문헌4에서 지적한 대로 틸사이 Jet류가 Coanda 효과로 직경이 큰 원기둥 쪽에 접촉하면서 흐르는 현상이 확인되었고 이때 방향은 고정된 안정된 흐름이었다. W가 1.54에서 경사류의 방향이 반대로 직경이 작은 원기둥 쪽으로 바뀌

었으며 이 현상은 풍속이 0.7m/s때와 같았다. 단 풍속이 0.7m/s에서는 W가 1.22이하에서 불안정한 방향변화가 존재하였으나 풍속이 빨라진후 (f), (g)와 같이 안정된 방향으로 기울어져 흐름이 확인되어 문헌4의 결과를 확인 할 수 있다.

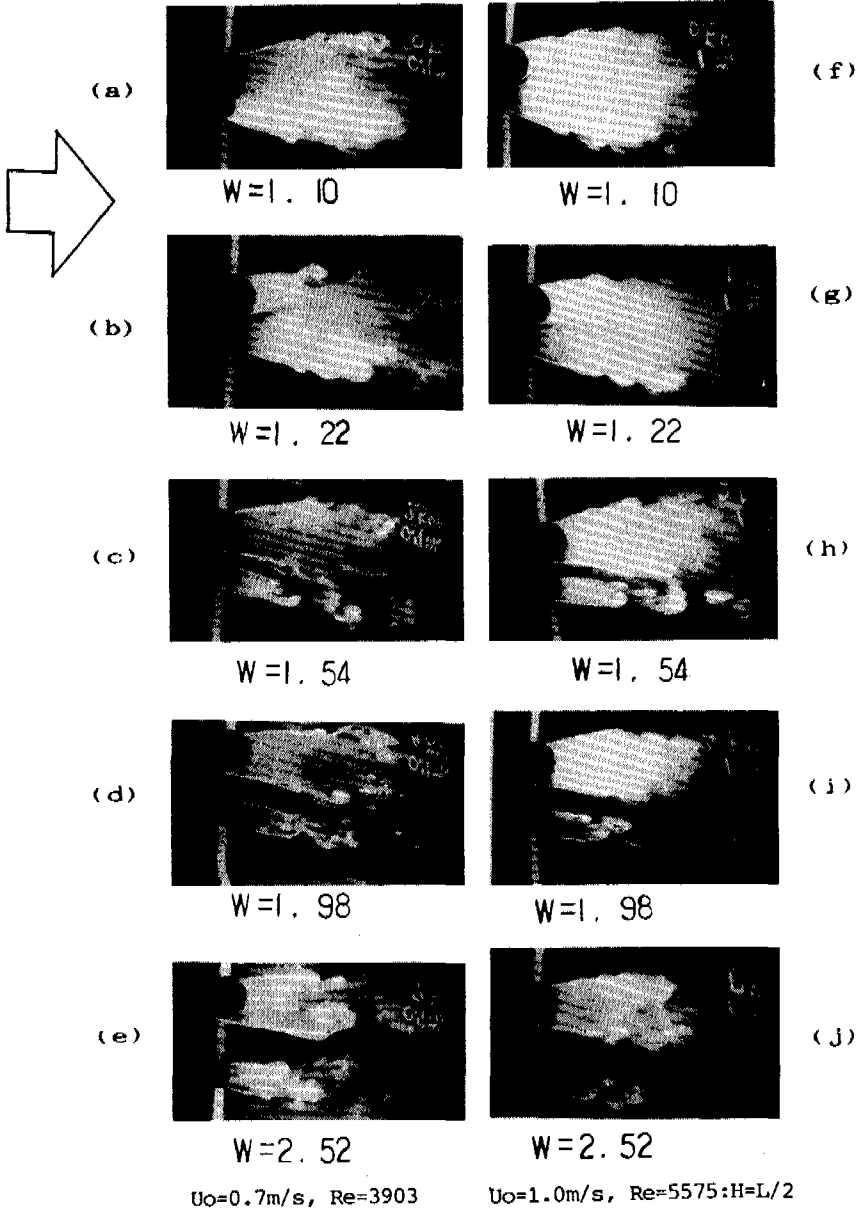


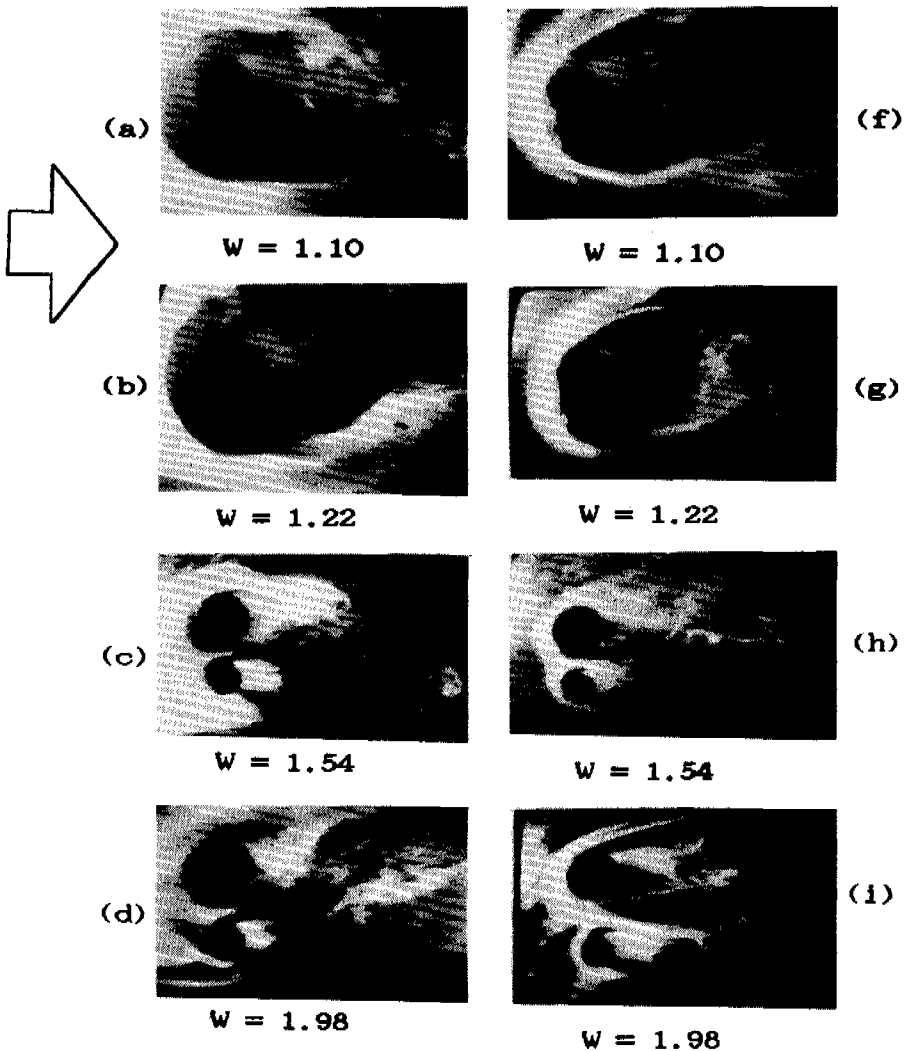
Fig. 3 크기가 서로 다른 두 원주 주위의 유동

그림4는 그림3과 같은 배치에서 지면판위 유동장($H=0$)을 나타낸다.

(a)~(e)는 장애물 전방 상류쪽 경계층내부에 시약을 도색하여 장애물 주위 박리현을 가시화 하였던 데 W 가 1.54에서 두개의 영역으로 분리됨을 알 수 있다. (f)~(j)는 장애물 하단부, 지면판과 접촉 부분의 상류측에 시약을 도색하여 박리영역 내부에 발생하는 장애물을 감싸고 하류로 흐르는 목걸이형 와류(Necklace Vortices)

를 가시화 하였다. 박리영역에서와 같이 W 가 1.54에서 두개의 와류로 분리되며 장애물 하류쪽의 복잡한 3차원 후류의 양상을 볼 수 있다.

그림4는 장애물 바로 위에서 내려다본 2차원 유동장이며 3차원 유동장의 특징을 입체화시키기 위해 그림5에서는 측면 후방에서 내려다본 목걸이형 와류를 나타내고 있다. 장애물 쪽으로 역류한 흐름이 하류쪽



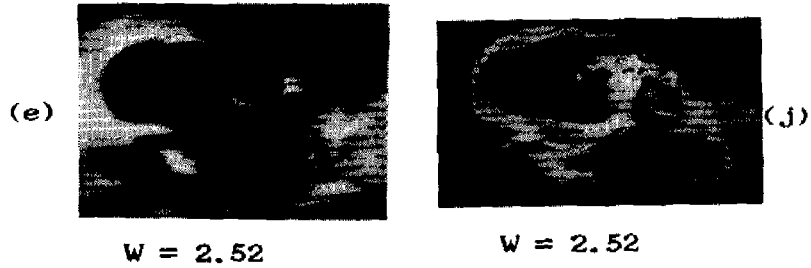


Fig. 4, Fig. 3의 지면판위의 유동장
($U_0=0.6\text{m/s}$, $Re=3417$, $H=0$)

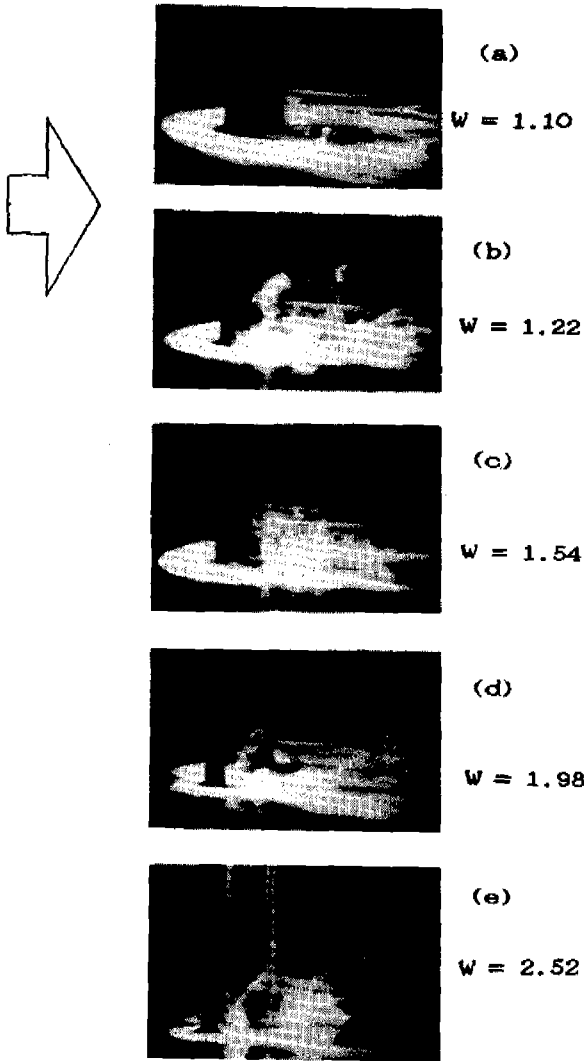


Fig. 5, Fig. 4 유동장의 측면도
($U_0=0.6\text{m/s}$, $Re=3417$, $H=0$)

기둥면을 따라 상승한 후 하류쪽으로 방출되는 입체적 양상을 보여주고 있다. 이 3차원 유동장을 좀더 명확히 포착하기 위해서는 복수의 촬영장비와 조명장치의 개선이 있어야 하며 연속사진의 전 화면을 게재해야만 이해에 도움이 되겠지만 지면관계로 몇장의 사진만 게재하기로 했다.

5.3 사각기둥과 원기둥

그림6(a)~(e)는 풍속 0.7m/s 일때 원기둥의 직경과 같은 크기의 사각기둥 주위 유동장이다. W 가 2.02 이하에서 경사류는 사각기둥 쪽으로 기울다 2.02 보다 넓어지면 원기둥 쪽으로 방향이 바뀐다. 풍속을 1.1m/s 로 증가시키면 W 가 1.56 이하에서는 사각기둥 쪽으로 기울어지다가 W 가 2.02 에서 원기둥 쪽으로 경사류의 방향이 바뀌어 풍속에 증강 의해서도 영향을 받음을 알 수 있다.

W 가 2.02 에서 풍속 0.7m/s 에서는 사각기둥 틈사이 박리점이 하류쪽에 있으나(d), 풍속이 1.1m/s 로 증가하니, 박리점이 상류 쪽으로 전진하였으며(i), 따라서 사각기둥 후류의 폭이 넓어지고 경사류 방향이 원기둥 쪽으로 기울어졌다. 원기둥과 원기둥 조합에서는 박리점 이동이 분명치 못하여 이 현상을 확인 할 수 없었으나 박리점을 쉽게 포착 할 수 있는 사각기둥과의 조합에서 두 기둥사이의 간격과 박리점 이동과의 관계가 확인되어 문헌4의 토론을 증명한 결과 이

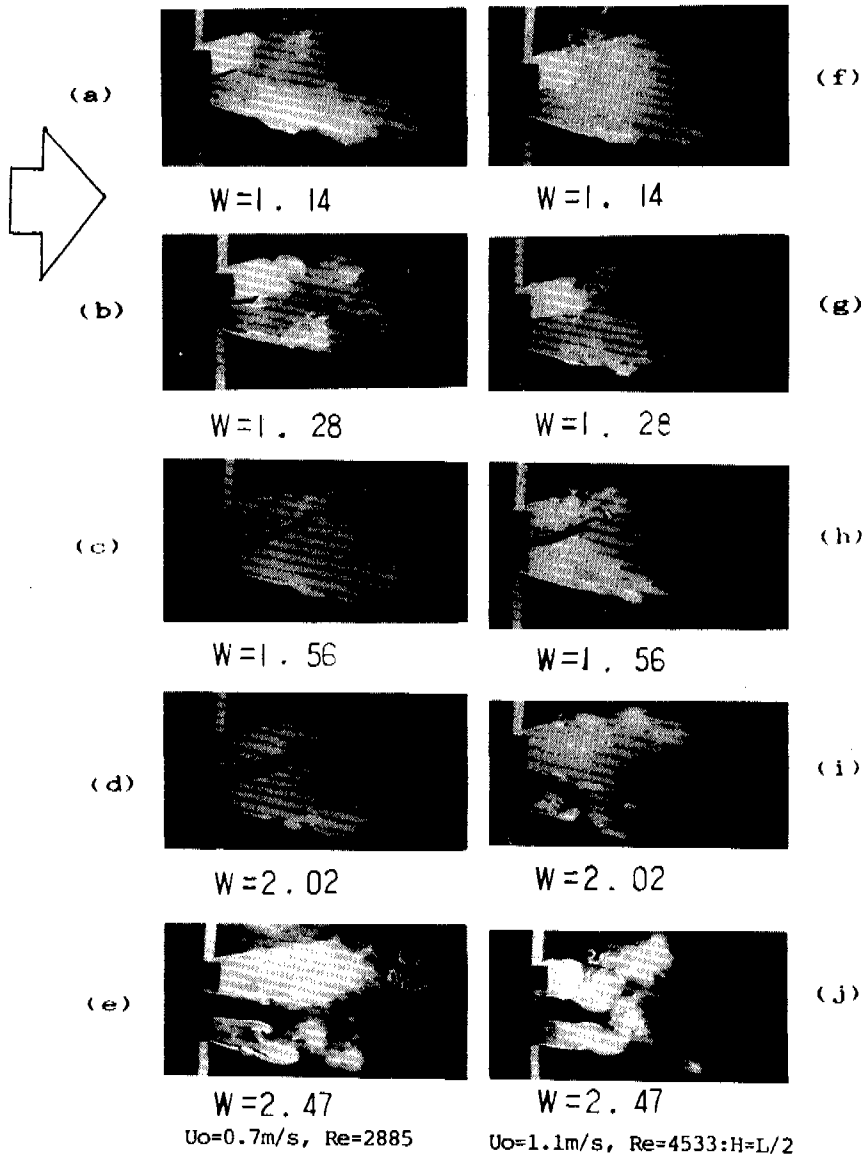


Fig. 6 사각 기둥과 원주 주위의 유동

다. 두 기둥이 충분히 접근하면 사각기둥의 틈쪽 박리점이 하류쪽으로 후퇴하고 그 결과 후류 폭은 좁아지면서 경사류가 사각기둥 쪽으로 기울어짐이 (a), (f)에서 확인되었고 이때 풍속의 변화에 대한 영향은 거의 불수가 없었다.

그림7(a)~(f)는 그림6과 같은 배치에서 지면판위 박리영역을 나타내고 있다. W 가 2.47 근방에서 박리영역이 두개로 나누어지며 원기둥 하류쪽이 먼저 상류쪽으로 역류하여 기둥 뒷면에서 기둥을 따라 상승한 후 불규칙하게 하류로 방출된다. W 가 3.05이

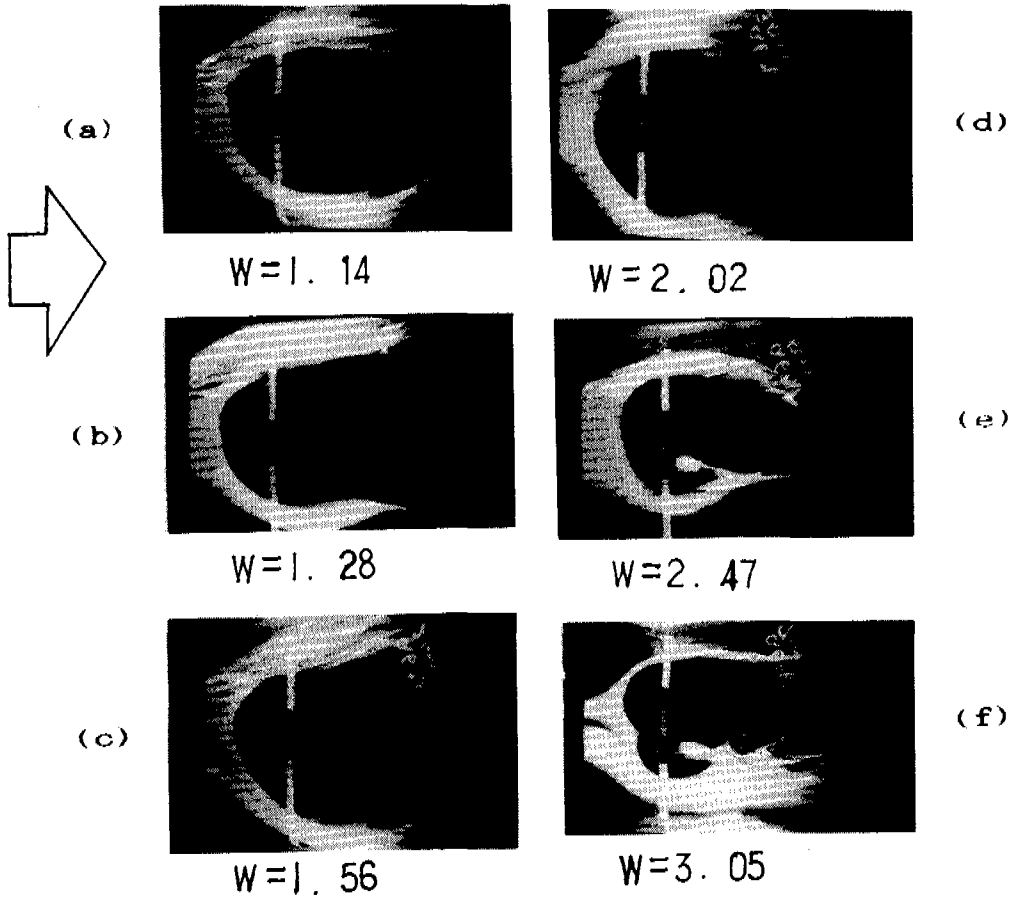


Fig. 7 Fig.6의 지면판위 유동장
($U_0=0.6, Re=2473, H=0$)

상에서는 사각기둥 하류쪽에서도 같은 유동장이 형성되었다.

그림8(a)~(f)는 그림7의 박리영역 내부에서 발생하는 목걸이형 와류를 보여주고 있는데 그림7에서와 같이 W 가 2.47근방에서 두개의 와류로 분리되고 기둥 하류쪽 유동장은 그림7의 그것보다 더욱 복잡하다.

그림7과 8에서 사각기둥 주위의 박리영역과 목걸이형 와류의 규모가 원기둥 보다 큼을 알 수 있고 이는 쉽게 박리하는 유동장을 만들기 때문으로 예상된다.

그림9는 그림7을 측면 후방에서 내려다본 사진이며 후류의 입체적 움직임을 확인할 수 있다.

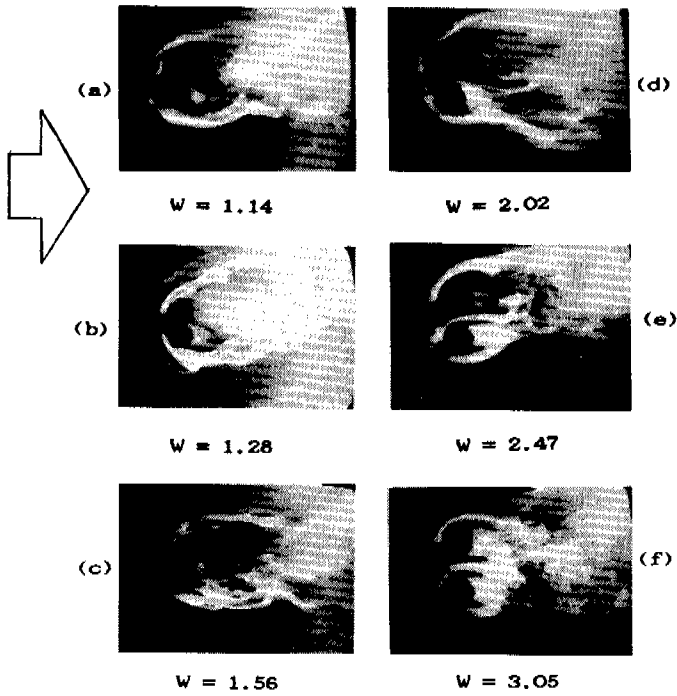


Fig. 8 Fig.6 유동장의 Necklace Vortex
($U_0=0.6$, $Re=2526$, $H=0$)

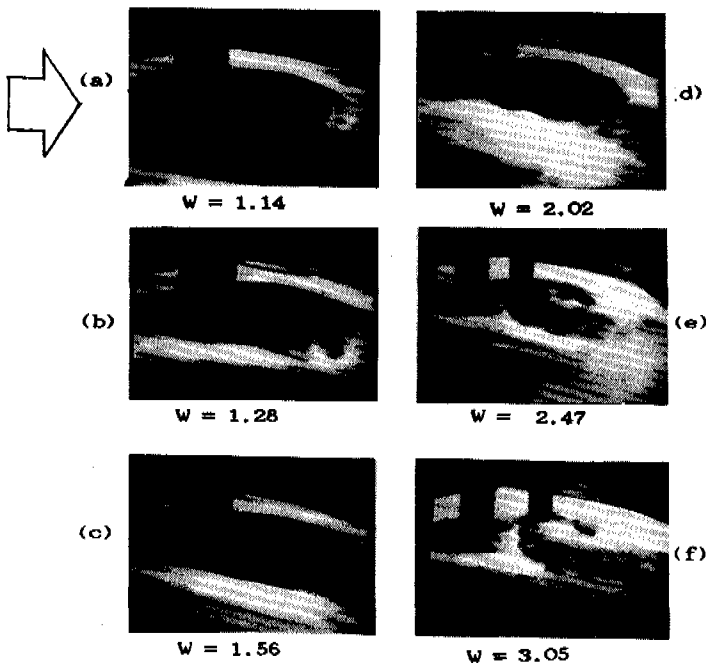


Fig. 9 Fig.7 유동장의 측면도
($U_0=0.6$, $Re=2473$, $H=0$)

5.4 단일 기둥 주위의 유동장

그림10은 앞에서 보인 복수 기둥 주위의 결과와 비교하기 위하여 단일 기둥의 측면 후방에서 목걸이형 와류를 내려다 본 사진이다. 기둥 하류쪽의 복잡한 유동장의 양상을 쉽게 확인할 수 있는데 (a), (b)는 직경

이 다른 원기둥이며 (c)는 사각기둥의 경우이다. 공통으로 하류쪽 후류가 기둥쪽으로 빨려 들어 가는 역류와 이 역류가 기둥 하류쪽면을 타고 어느정도 높이까지 상승한 후 방출되는 데 그 규모나 복잡성은 후류폭이 큰 (b), (c)가 (a)보다 크고 확실하다.

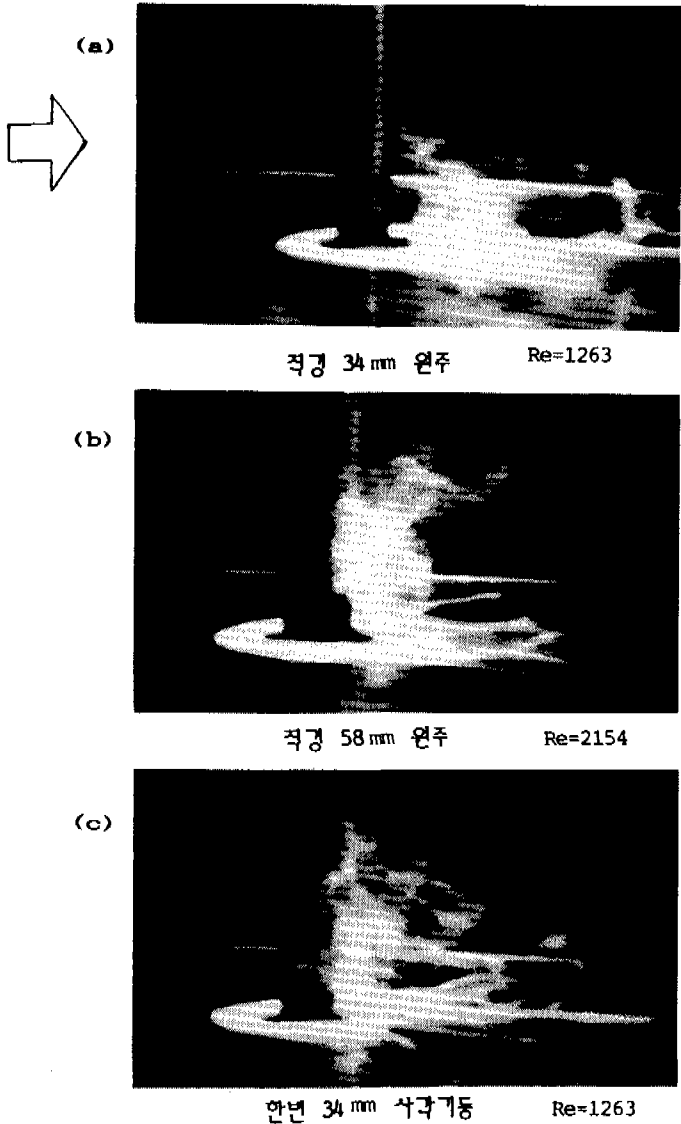


Fig. 10 단일모델 주위 유동장의 측면도 (Uo=0.6m/s, H=0)

6. 결 론

본 실험은 일정한 바람속도 안에서 지면판위에 복수 장애물이 바람방향과 수직으로 배열됐을 때 가시화 시약 도색법을 이용하여 장애물 주위 유동장을 가시화하였다. 바람의 속도는 0.6~1.1m/s이며 레이놀즈수는 복수 장애물 직경의 합을 고려하여 3,500~5,500의 범위이다. 지면판을 내려다본 정면사진은 천정에 거울을 경사지게 부착하여 촬영하였기 때문에 거울의 크기에 따라 유동장의 크기에 제한을 받았으며 3차원 유동장의 특징을 포착하기 위해 측면후방 사진을 첨부했으나 조명장비의 부실과 촬영장비의 성능부족으로 인하여 선명도는 떨어진다. 그러나 비디오 카메라를 이용한 연속 촬영으로 경제적·시간적 절약을 얻었고 재상 모니터 화면을 스틸 카메라로 재촬영할 때 모니터 화면의 밝기를 임의로 조절하여 조명장비의 부실한 점을 보완할 수가 있었다.

본 논문에 게재된 전부의 사진은 가시화 시약 도색후 어느 정도 시간이 경과하여 전 유동장이 가시화된 상태의 순간을 촬영한 정지 화면이다. 일정 풍속아래서 실행한 실험이지만 장애물 하류 후류는 시간에 따라 변동하는 비정상 운동을 하여 유동장 전체는 비정상 유동장이다. 비정상 유동장을 정지 화면을 놓고 분석하는 것이 불합리하여 유동장 분석은 모니터의 연속 화면을 관찰하면서 시행하고 전 연속 화면을 인쇄물에 게재함은 불가능하여 참고 자료로 몇장의 정지 화면을 게재했음을 지적해 둔다.

이상의 실험결과 다음과 같은 정성적 결론을 얻었다.

1) 2차원 유동장에서 장애물 사이의 간격이 좁아지면 후류의 간섭효과로 장애물 틈 사이에 반드시 경사류가 발생하며 흐름이 기울어지는 방향은 장애물 모양, 크기에 관계없이 후류의 폭이 좁은 쪽이다.

2) 3차원 유동장에서 지면판위의 박리선, 목걸이형 와류, 장애물 하류에서 후류의 양상과 상류쪽으로 빨려 들어 가는 역류의 양상이 확인 되었다. 특히 이 역류는 장애물을 따라 위로 상승한 후에 하류로 방출되었다.

3) 지면판 위에서는 장애물 사이 간격이 좁아져도 경사류가 관찰되지 않았다.

차후 표면조도의 영향, 경계층 두께에 의한 영향에 대한 정확한 실험이 요구되며, 고속 촬영장비 및 측정장비를 구비하여 정량적 분석이 병행되어야 가시화 실험 결과에 대한 완벽한 분석이 가능하리라 본다.

참고문헌

- 1) P. Fremuth, "Vortex Patterns of Dynamic Separation", *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol. 8, pp. 391-424, 1989, Gulf Publishing Company.
- 2) P. Fremuth, W. Bank, M. Palmer, "Use of Titanium Tetrachloride for Visualization of Accelerating Flow Around Airfoils", *Proceedings of the 3rd Intl. Symp. on Flow Visualization*, Ann Arbor, Sept. 6-9, pp. 99-105, 1983.
- 3) P. Fremuth, W. Bank, M. Palmer, "Further Experimental Evidence of Vortex Splitting", *J. Fluid Mech.*, Vol. 152, pp. 289-299, 1985.
- 4) Y. Ohya, A. Okajima, M. Hayashi, "Wake Interference and Vortex Shedding", *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol. 8, pp. 323-389, 1989, Gulf Publishing Company.