

자유류 난류와 표면 트립 와이어가 구 주위 유동에 미치는 영향

손광민* · 최진** · 전우평** · 최해천***

Effects of the Free-Stream Turbulence and Surface Trip Wire on the Flow past a Sphere

Kwang Min Son*, Jin Choi**, Woo-Pyung Jeon** and Haecheon Choi***

Keywords : Sphere(구), Free-stream turbulence(자유류 난류), Trip wire(트립 와이어), Drag(항력), Separation point(유동 박리점), Reattachment(재부착), Separation bubble(박리 기포)

Abstract

In the present study, effects of free-stream turbulence and surface trip wire on the flow past a sphere at $Re = 0.4 \times 10^5 \sim 2.8 \times 10^5$ are investigated through wind tunnel experiments. Various types of grids are installed upstream of the sphere in order to change the free-stream turbulence intensity. In the case of surface trip wire, 0.5mm and 2mm trip wires are attached from $20^\circ \sim 90^\circ$ at 10° interval along the streamwise direction. To investigate the flow around a sphere, drag measurement using a load cell, surface-pressure measurement, surface visualization using oil-flow pattern and near-wall velocity measurement using an I-type hot-wire probe are conducted. In the variation of free-stream turbulence, the critical Reynolds number decreases and drag crisis occurs earlier with increasing turbulence intensity. With increasing Reynolds number, the laminar separation point moves downstream, but the reattachment point after laminar separation and the main separation point are fixed, resulting in constant drag coefficient at each free-stream turbulence intensity. At the supercritical regime, as Reynolds number is further increased, the separation bubble is regressed but the reattachment and the main separation points are fixed. In the case of surface trip wire directly disturbing the boundary layer flow, the critical Reynolds number decreases further with trip wire located more downstream. However, the drag coefficient after drag crisis remains constant irrespective of the trip location.

1. 서론

대표적인 3차원 물체인 구는 기하학적 단순성에도 불구하고 구 주위 유동은 레이놀즈 수에 따라 복잡하게 변화한다. 특히 임계 레이놀즈 수 (critical Reynolds number)인 3.5×10^5 근방에서 구 표면에 작은 박리 기포가 형성되면서 항력이 급격하게 감소하는 drag crisis는 많은 사람들의 관심의 대상이 되었다. Achenbach[1]는 임계 레이놀즈 수에 따라 항력이 급감한다는 사실을 발견하고 레이놀즈 수를 기준으로 구 주위 유동을 4개의 영역으로 분류하였다. Taneda[2]는 구 후류 구조를 가시화를 통해 보였는데 vortex sheet이 Ω 모양을 그리며 불규칙하게 회전하며 떨어져 나온다고 하였다. Kim and Durbin[3]과 Sakamoto and Haniu[4]는 구 주위 유동에는 후류 불안정성과 관련된 저 주파수 성분과 박리 직후 얇은 전단층의 불안정성과 관련된 고 주파수 성분이 존재한다고 보았다. Jeon 등 [5]은 구 표면의 층류 박리 직전에 주기적인 분사/흡입을 주어 구의 항력을 50%정도 줄이는 능동제어를 하였다. 이때 임계 가진 주파수가 경계층 내 불안정성을 증폭시키고 이로 인해 층류 박리된 유동이 다시 재부착되면서 박리 기포를 생성시켜 항력이 감소하는 것을 보였다. Choi, Jeon and Choi[6]는 가시화와 속도장 측정을 통해 담플이 구의 항력을 줄이는 메커니즘을 밝혔

다.

Bearman and Morel[7]은 자유류 난류가 있는 경우 실린더 주위 유동에 어떤 영향을 주는지 이전 자료들로부터 조사하였다. 그 결과, 자유류 난류는 경계층과 박리 전단층에서 난류로의 천이를 앞당기고 전단층에서의 혼합과 자유류의 후류로의 흡입을 증가시킨다고 하였다. Maxworthy[8]는 구의 전면부에 트립을 부착해 항력계수가 어떻게 변하는지 보았고, Nakamura and Tomonari[9]는 트립 대신 거칠기가 있는 띠를 구 표면에 붙여 항력감소를 확인했다. 하지만 자유류 난류와 구 표면 트립이 있는 경우 왜 감소한 항력이 일정한 값을 유지하는지, 어떤 과정을 거치며 항력이 감소하는지 그리고 높은 레이놀즈 수의 매끈한 구 주위 유동과 어떠한 관련이 있는지는 보이지 않았다.

본 연구에서는 자유류 난류와 트립 와이어가 구 주위 유동에 어떤 영향을 주는지를 로드셀을 이용한 항력 측정, 구 표면 압력 측정, 오일 표면 가시화, 열선 유속계를 이용한 구 표면 경계층 측정을 통해 살펴보고, 항력 감소 메커니즘과 매끈한 구 주위의 유동과의 연관성을 고찰하였다.

2. 실험 장치 및 구성

실험은 분출식 개방형 풍동에서 수행되었으며 수축부 출구는 600×600 mm 이다. 시험부에서의 최대 풍속은 30m/s 이며 10m/s에서 난류 강도는 0.5% 이내이며 시험부의 평균 속도 균일도는 0.2%이다. 실험에 사용된 구의 지름은 150mm이며

* 서울대학교 대학원, sdlive0@snu.ac.kr

** 서울대학교 정밀기계설계공동연구소, jin75@snu.ac.kr

** 서울대학교 정밀기계설계공동연구소, wpjeon@snu.ac.kr

*** 서울대학교 기계항공공학부, choi@snu.ac.kr

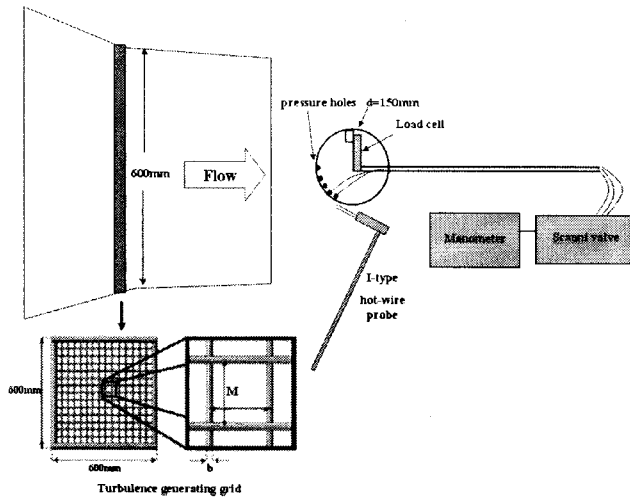
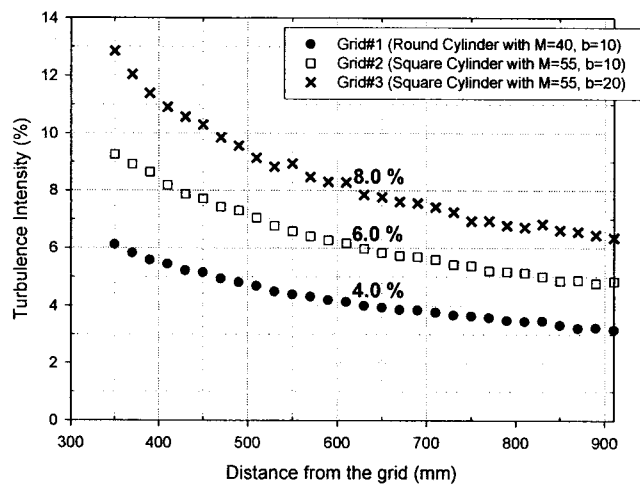


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental set up

ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene) 수지로 제작되었다(Fig. 1). 실험은 자유 유동 속도 5m/s ~ 28m/s 범위에서 수행되었으며 구 직경을 기준으로 한 레이놀즈 수는 $Re = 0.5 \times 10^5 \sim 2.8 \times 10^5$ 이다. 구의 단면적과 수축부 면적 비로 계산한 차폐율은 5% 정도이다. 구의 항력, 압력, 속도 측정 결과는 A/D 컨버터를 통해 PC로 전송하여 후처리 하였다.

구의 항력은 최대 10N까지 측정 가능하며 최대오차가 0.1%인 로드셀(BCL-1L, Cass)을 통해 측정하였으며, 출력은 변위 증폭기를 통하여 1000배 증폭이 되어 1N일 때 1 volt를 출력하게 조절되었으며 입력과 출력은 선형관계에 있다. 구 표면에서 압력을 측정하기 위해 총 27개의 압력 탭을 구 표면에 수직 방향으로 뚫었는데 이때 압력 탭간의 간섭을 피하기 위해 유동 방향으로 태극 무늬를 그리며 탭을 배치시켰다. 압력은 스캐니 밸브를 거쳐 0 ~ 10 torr 측정 범위를 가지는 MKS 220CD 마노미터에서 이뤄졌으며, 압력은 평균값이 충분히 수렴될 수 있도록 각 측정 위치에서 15초간 계속한 순간 압력을 평균하였고 100Hz의 sampling rate으로 데이터를 받았다. 또 박리점과 박리기포의 위치를 확인하기 위해 titanium dioxide를 이



Grid	Bar Geometry	M (mm)	b (mm)	Tu (%)
1	circular	40	10	4
2	square	55	10	6
3	square	55	20	8

Fig. 2. Turbulence intensity variation along the centerline of the test section and the specifics of the grids

용해 오일 가시화를 수행하고 열선 유속계를 이용해 구 주변 속도장을 측정하였다.

속도 측정에 이용된 I-probe는 컴퓨터에 의해 제어되는 스텝 모터에 연결된 2차원 트레버싱 장치에 연결되어 구 주위 유동을 측정하였다. I-probe는 피토투브와 마노미터에서 읽어 들인 속도를 기준으로 전압 대 속도를 4차 polynomial 식에서 least square 방법을 이용해 보정했다.

자유류 난류 강도를 높이기 위해 원형 실린더와 사각 실린더를 이용해 3개의 격자를 만들었는데 난류 강도는 bar의 형태와 mesh width (M), bar width (b)에 의해 결정되었다(Fig. 1). 구 주변 유동의 등방 난류(isotropic turbulence)를 보장하기 위해 Batchelor[10]가 제시한 데로 격자와 구 정체점 사이 간격을 10 M 이상이 되게 배치하였고 이때 구 중심 기준 난류 강도는 4%, 6%, 8%였다. 구 표면 trip wire의 경우 0.5mm, 2mm trip을 구 정체점 기준 20°에서 90° 사이에 10° 간격으로 붙여가며 실험을 수행하였다.

3. 실험 절차 및 결과

3.1 자유류 난류

자유류 난류는 3개의 격자를 구 상류에 설치해 발생시켰다. Fig. 2에서처럼 원형 실린더로 만든 격자 1개와 정사각 실린더로 만든 격자 2개를 이용해 구 중심에서의 자유류 난류 강도가 격자 별로 비슷한 간격이 되도록 격자를 설계하였다 ($Tu = 4\%, 6\%, 8\%$). Fig. 3은 자유류에 난류가 있는 경우 구의 항력 변화량을 나타낸다. 매끈한 구의 경우 레이놀즈 수 $Re = 0.5 \times 10^5 \sim 2.8 \times 10^5$ 에서는 $C_d = 0.5$ 근방의 값을 유지하다 자유류 난류가 있는 경우에는 임계 레이놀즈 수는 변하지만 항력계수가 레이놀즈 수의 증가에 따라 급격히 감소하는 drag crisis가 발생하고 이후 일정한 값을 유지한다. 이때 항력감소량은 매끈한 구에 비해 70% 정도이다. 자유류 난류 강도가 커질수록 drag crisis가 더 낮은 레이놀즈 수에서 발생한다.

Drag crisis가 일어나는 레이놀즈 수 범위에서 구 주위 경계 층과 전단층의 특성은 급격하게 변화한다고 알려져 있는데, 이것을 확인하기 위해 오일을 이용한 표면 가시화(Fig. 4)와 열선 유속계를 이용한 구 표면 근처 주유동 속도 측정(Fig. 5)을 수행하였다. 항력 계수 측정 결과와 가시화 결과를 종합해 볼 때, 3개의 격자 중 4% 난류강도를 보이는 첫번째 격자에서는

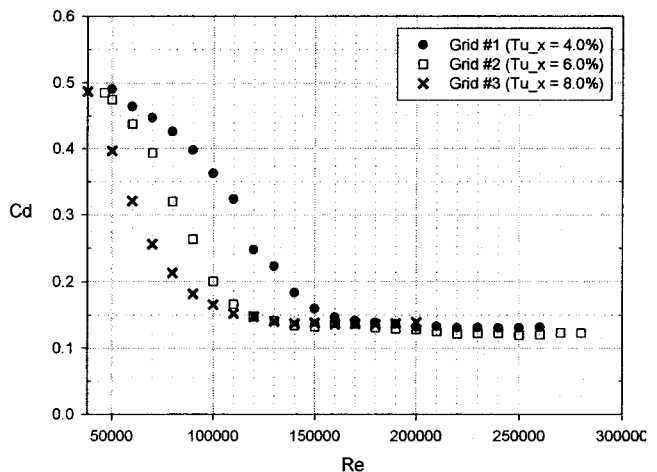


Fig. 3. Variations of the drag coefficient

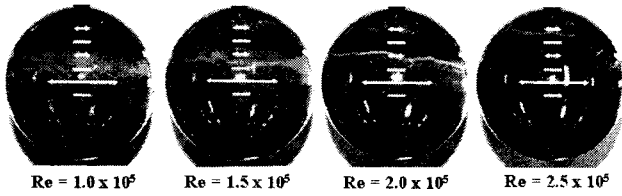


Fig. 4. Variation of the separation angle and constant reattachment angle when secondary separation bubble exists. At $Re = 2.5 \times 10^5$ there is no secondary separation bubble. The flow is from bottom to top.

실험 범위 내에서 박리기포가 완전히 사라지지 않았고 세번째 격자(8%)의 경우 층류 박리 이후 영역부터 나타났기에 모든 현상을 다 보여주는 두번째 격자(6%)에 대해 주 유동 속도를 측정하였다. 가시화 결과 drag crisis와 함께 박리기포가 생겼고 레이놀즈 수가 커질수록 박리기포의 크기가 점점 줄어들다가 $Re = 2.3 \times 10^5 \sim 2.5 \times 10^5$ 이후 박리기포가 완전히 사라지고 난류 박리가 130° 부근에서 일어났다. 가시화 그림 표면(Fig. 4)의 하얗고 넓은 때가 박리 기포를 나타내는데 앞 선은 층류 박리, 뒤쪽 선은 재부착 그리고 마지막 선은 난류 박리를 나타낸다. 박리기포의 생성은 drag crisis와 밀접한 연관이 있는데, 가시화 결과 Re가 커짐에 따라 박리 기포가 줄어들 때 재부착 지점은 115° 부근으로 고정되어 고정이 되고 층류 박리점만 뒤로 밀리며 서서히 사라졌다. 이 현상은 3개의 격자 모두에서 공통적으로 나타났다. 박리 기포는 $Re = 1.0 \times 10^5$ 정도에서부터 나타나서 항력이 일정한 구간에서도 존재하다가 사라지는데 박리기포의 크기가 줄어드는 과정에서 항력이 거의 일정하게 유지되는 것으로 봐서 최종 난류 박리점은 130° 부근으로 고정됨을 알 수 있다.

위의 현상이 일어나는 정확한 각도와 층류에서 난류로의 천이점을 알아보기 위해 격자 2번에 대해 I-형 열선 유속계를 이용해 속도장을 측정하였다(Fig. 5). Drag crisis가 일어나기 전인 $Re = 0.5 \times 10^5$ 에서는 유동 박리가 $80^\circ \sim 90^\circ$ 사이에서 일어난다. 이때 유동 박리는 속도장이 벽면에 대해 수직으로 일정한 값을 유지하게 되는 것으로 알 수 있다. Drag crisis가 거의 끝나는 $Re = 1.0 \times 10^5$ 에서 박리기포의 크기가 가장 크고 이때 $90^\circ \sim 100^\circ$ 사이에서 층류 박리가 일어나고 재부착은 115° 부근에서 일어나고 120° 이후 난류 박리가 발생한다. 난류 박리는 측정된 경계층의 난류 강도가 120° 에서 급격하게 커지는 것으로부터 확인할 수 있다. 박리기포가 가장 크게 존재하는 $Re = 1.0 \times 10^5$ 경우에도 기포의 높이는 1mm이내이므로 박리기포가 drag crisis와 밀접한 연관성이 있음에도 실험적으로 해석하기 매우 어렵다. $Re = 2.5 \times 10^5$ 에서는 층류 박리 없이 바로 난류 박리가 120° 이후에서 일어남을 확인할 수 있다.

3.2 표면 트립 와이어

자유류에 난류가 있는 경우와 달리 표면 트립 와이어는 구의 경계층에 직접적인 변화를 준다. 이 경우에도 자유류에 난류를 준 경우와 같이 매끈한 구에 비해 drag crisis가 더 낮은 레이놀즈 수에서 일어난다. Fig. 6은 $20^\circ \sim 70^\circ$ 사이에 10° 간격으로 0.5mm 트립을 부착한 경우 항력 변화량을 나타낸다. 트립의 부착 위치가 층류 박리점에 가까울수록 임계 레이놀즈 수가 낮아지지만 drag crisis 이후 항력 계수는 트립 부착 위치와 무관하게 일정한 값을 나타낸다. 이는 트립이 정체점 근처에

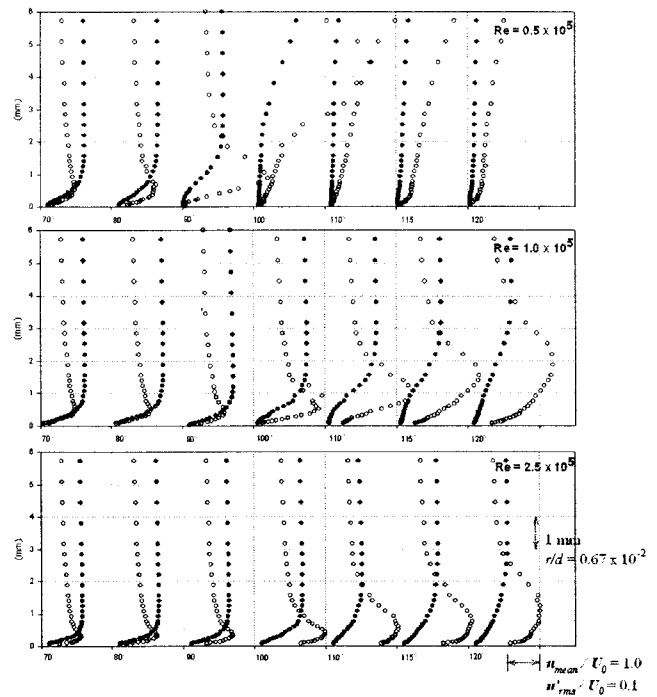


Fig. 5. Profiles of the time-averaged streamwise velocity (●) and rms streamwise velocity fluctuations (○) measured at angles between $70^\circ \sim 120^\circ$ with 6% free-stream turbulence intensity.

붙어 있을 때는 높은 레이놀즈 수에서 경계층 천이를 야기시키지만 층류 박리점에 가까이 트립이 부착되어 있을 때는 경계층에 더 큰 영향을 줘 임계 레이놀즈 수를 낮추게 된다. 하지만 트립의 부착 위치와 무관하게 drag crisis 이후 난류 박리점은 고정되고 항력계수는 일정한 값을 유지하게 된다. 트립을 부착한 경우의 가시화 결과 박리 기포가 존재한다는 것을 확인할 수 있었고, 50° 에 트립을 부착한 경우 압력 계수 측정 결과(Fig. 7)에서도 박리기포의 존재를 예상할 수 있다. Drag crisis의 마지막 부분인 $Re = 1.5 \times 10^5$ 경우 $95^\circ \sim 120^\circ$ 사이에서 압력이 평평한 구간이 존재하는데 이 구간이 박리기포가 존재하는 구간이며 이는 가시화와 속도장 측정 결과와도 잘 일치한다. 후면을 제외하고는 항력 값의 평평한 구간이 없는 $Re = 2.3 \times 10^5$ 에서는 박리기포의 생성 없이 130° 부근에서 바로 난류 박리가 일어난다. 이때의 압력 계수 곡선은 박리기포가 없기 때문에 $90^\circ \sim 120^\circ$ 구간에서 오목한 포물선 형상을 띈다.

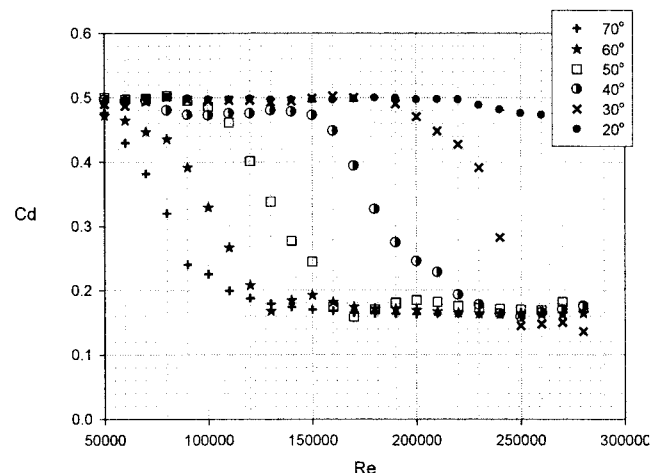


Fig. 6. Variations of the drag coefficient (0.5mm trip wire)

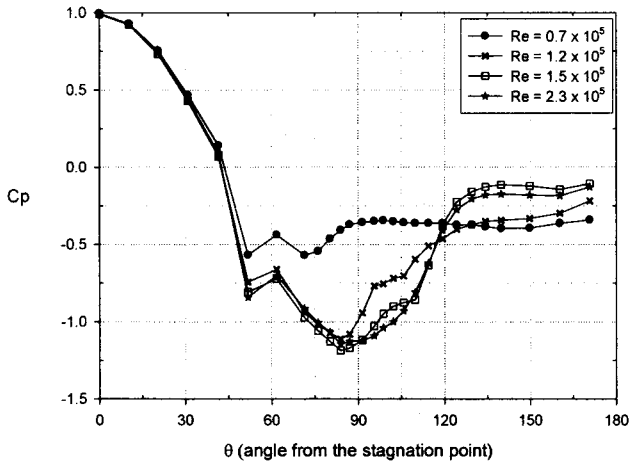


Fig. 7. Variation of the pressure coefficient for 0.5mm trip wire attached at 10° from the stagnation point

2mm 트립 와이어 실험 결과는 Fig. 8에 개략도를 그려 나타냈다. 2mm 트립을 50°에 부착한 경우 경계층 두께에 비해 워낙 큰 변화를 줬기에 Fig. 8과 같이 트립 뒤에 전단층 불안정성에 의한 박리 기포가 생기고 이후 난류 경계층으로 재부착되며 박리점을 지연시켰다. 2mm 트립의 경우 난류로의 천이가 항상 트립이 부착된 곳에서 일어났고 drag crisis 이후 압력 계수는 박리기포 생성 없이 난류 경계층이 성장하다 130° 부근에서 박리되는 0.5mm 트립의 $Re = 2.3 \times 10^5$ 과 같이 포물선 형상을 나타냈다.

4. 결론

본 연구에서는 자유류 난류 강도를 변화시킬 때와 구 표면에 부착된 트립 와이어를 이용해 구 표면 경계층에 직접적인 변화를 줬을 때 구 주위 유동이 어떠한 영향을 받는지에 대해 풍동 실험으로 고찰하였다.

자유류 난류가 있는 경우와 표면 트립 와이어를 부착한 경우 모두 매끈한 구에 비해 임계 레이놀즈 수가 줄어들어 drag crisis가 일찍 발생했다. 자유류 난류강도가 높을수록, 트립의 부착 위치가 층류 박리점인 80°에 가까울수록 drag crisis가 일찍 일어났다. 하지만 두 경우 모두 drag crisis 이후 항력 계수는 레이놀즈 수가 증가하더라도 일정한 값을 유지했는데 이는 레이놀즈 수의 증가에 따라 층류 박리점이 하류로 이동함에도 불구하고 마지막 재부착 지점과 최종 박리점이 고정되기 때문이다. 레이놀즈 수의 증가에 따른 층류 박리점의 하류로의 이동과 재부착 지점의 고정은 drag crisis와 함께 나타나 박리기포가 점점 작아지다 없어지는 현상으로 관측되었다.

본 연구에서는 구 주위 유동과 구의 경계층에 변화를 줘

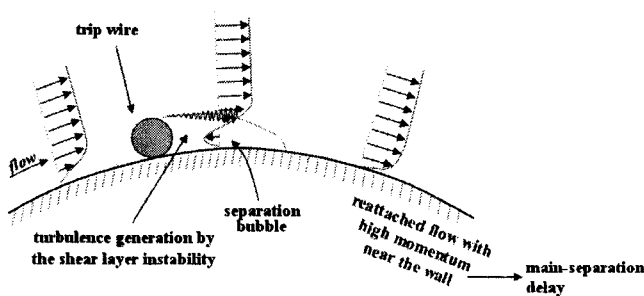


Fig. 8. Mechanism of drag reduction by 2mm surface trip wire

drag crisis 현상과 밀접한 연관성이 있는 박리기포의 생성과 소멸을 확인할 수 있었다. 앞으로 정밀한 유동장 측정을 통해 3차원 물체에서의 drag crisis, 박리기포 생성과 소멸 과정의 구체적인 메커니즘에 대한 고찰이 필요할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업과 교육인적자원부의 BK21의 지원 하에 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Achenbach, E., 1972, "Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers," J. Fluid Mech. Vol. 54, pp.565-575
- [2] Taneda, S., 1978, "Visual observations of the flow past a sphere at Reynolds number between 10^4 and 10^6 ," J. Fluid Mech. Vol. 85, pp.187-192.
- [3] Kim, H. J. & Drubin, P. A., 1988, "Observations of the frequencies in a sphere wake and of drag increase by acoustic excitation," Phys. Fluids. Vol. 31, pp.3260-3265.
- [4] Sakamoto, H. & Haniu, H., 1990, "A study on vortex shedding from spheres in a uniform flow," Trans. ASME: J. Fluids Eng. Vol. 112, pp. 386-392.
- [5] Jeon, S., Choi, J., Jeon, W. -P., Choi, H. & Park, J., 2004 "Active control of flow over a sphere for drag reduction at a subcritical Reynolds number," J. Fluid Mech. Vol. 517, pp.113-129.
- [6] Choi, J., Jeon, W. -P. & Choi, H., 2006, "Mechanism of drag reduction by dimples on a sphere," Phys. Fluids. Vol. 18, pp.18-21
- [7] Bearman, P. W., & Morel, T., 1983, "Effect of free stream turbulence on the flow around bluff bodies," Progress Aerospace Sciences. Vol. 20, pp.97-123
- [8] Maxworthy, T., 1969, "Experiments on the flow around a sphere at high Reynolds numbers," J. Appl. Mech. Vol. 36, pp.598-607
- [9] Nakamura, Y. & Tomonari, Y., 1982 "The effects of surface roughness on the flow past circular cylinders at high Reynolds numbers," J. Fluid Mech. Vol. 123, pp. 363-378
- [10] Batchelor, G. K., 1953, *The theory of homogeneous turbulence*, Cambridge University Press.