

## 구에 설치한 딴플과 표면 거칠기에 의한 항력 감소 메커니즘

최진\* · 전우평\* · 최해천\*\*

### Mechanism of Drag Reduction by Dimples and Roughness on a Sphere

Jin Choi\*, Woo-Pyung Jeon\* and Haecheon Choi\*\*

**Keywords :** Sphere(구), Separation dealy(박리 지연), Drag reduction(항력 감소), Dimple(딴플), Surface roughness(표면 거칠기)

#### Abstract

In this paper, we present a detailed mechanism of drag reduction by dimples and roughness on a sphere by measuring the streamwise velocity above the dimpled and roughened surfaces, respectively. Dimples cause local flow separation and trigger the shear layer instability along the separating shear layer, resulting in generation of large turbulence intensity. With this increased turbulence, the flow reattaches to the sphere surface with high momentum near the wall and overcomes strong adverse pressure gradient formed in the rear sphere surface. As a result, dimples delay main separation and reduce drag significantly. The present study suggests that generation of a separation bubble, i.e. a closed-loop streamline consisting of separation and reattachment, on a body surface is an important flow-control strategy for drag reduction on a bluff body such as the sphere and cylinder. In the case of roughened sphere, the boundary layer flow is directly triggered by roughness and changes to a turbulent flow. Due to this change, the drag significantly decreases. As the Reynolds number further increases, transition to turbulence occurs earlier on the sphere surface. Because of faster growth of turbulent boundary layer by roughness, earlier transition thickens the boundary layer, resulting in earlier separation and drag increase with increasing Reynolds number.

#### 1. 서론

골프공의 딴플은 두 가지 재미있는 유동 특성을 가지고 있는데, 첫째는 매끈한 구에 비하여 항력을 50% 감소시킨다는 점이고 둘째는 항력 감소 후에도 레이놀즈수에 따라 일정한 항력계수를 유지한다는 점이다. 일반적으로 딴플의 항력감소에 관하여 알려진 사실은 딴플이 거친 표면처럼 구 주위 경계층을 난류로 천이 시켜 주박리점을 하류로 지연시킨다는 점이다. 구에 설치된 딴플의 유동 현상에 관한 구체적인 연구는 Bearman & Harvey<sup>1</sup>에 의하여 시도되었다. 그들은 임계 레이놀즈수 이후 항력계수가 증가하는 거친 표면의 구 (Achenbach<sup>2</sup>)와는 달리 딴플이 설치된 구는 항력계수가 일정하게 유지됨을 보였으며 (Fig. 1), 이 원인으로는 난류로의 천이가 일정한 딴플에서 발생하기 때문이라고 추론하였다. 그러한 근거는 일정한 곳에서 난류로의 천이를 발생시키는 트립 와이어를 설치한 구나 실린더의 항력계수 감소에 관한 실험(Maxworthy<sup>3</sup>, Nakamura & Tomonari<sup>4</sup>)에서 찾을 수 있다. 그러나, 딴플 주위의 유동은 측정하기가 매우 힘들기 때문에 위의 추론에 대한 실험적 근거가 제시되지 못하였다. 딴플에 관한 연구는 이후에도 꾸준히 계속 되었는데, Bearman & Harvey<sup>5</sup>는 실린더에 딴플을 설치하여 유동특성을 연구하였고, Ligrani<sup>6</sup>는 채널에 딴

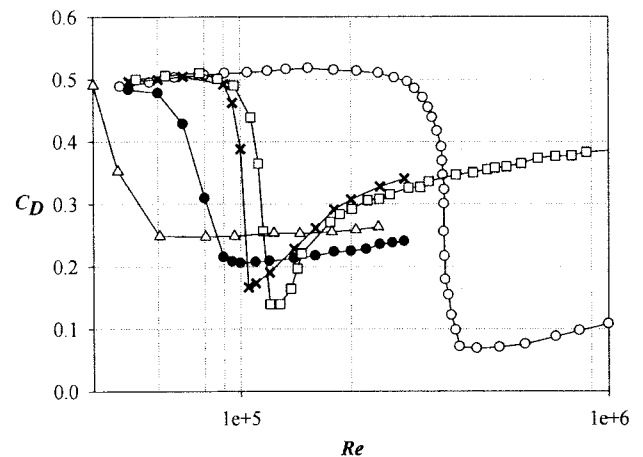


Fig. 1 Variations of the drag coefficient as a function of Reynolds number: ○, smooth sphere (Achenbach<sup>2</sup>); △, dimpled sphere ( $k/d=0.9 \times 10^{-2}$ ; Bearman & Harvey<sup>1</sup>); □, roughened sphere ( $k/d = 0.5 \times 10^{-2}$ ; Achenbach<sup>2</sup>); ●, dimpled sphere ( $k/d = 0.4 \times 10^{-2}$ ; present); ×, roughened sphere ( $k/d = 0.66 \times 10^{-2}$ ; present)

플을 설치하여 유동특성을 연구하기도 하였다. 그러나, 이러한 연구들에도 불구하고 자세한 측정 데이터가 제시되지 않았다. 한편 Jeon et. al<sup>7</sup>은 매끈한 구의 76° 위치에서 흡입/분사의 능동 제어를 수행하였고, 그 결과 임계 레이놀즈수의 구 표면에 발생하는 박리기포 (Suryanarayana<sup>8</sup>)를 인위적으로 생성시켜 50% 이상의 항력감소를 얻었으며 골프공의 항력감소와 비슷한  $C_D-Re$ 의 관계를 발견하였다.

\* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소, jin75@snu.ac.kr  
\* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소, wpjeon@snu.ac.kr  
\*\* 서울대학교 기계항공공학부, choi@snu.ac.kr

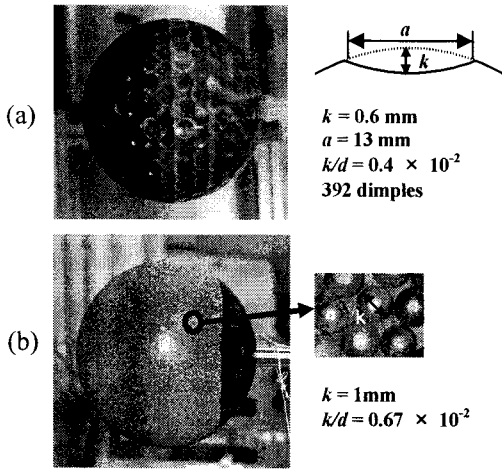


Fig. 2 (a) dimpled sphere; (b) roughened sphere

지금까지 딴플에 관한 연구가 많이 수행되었음에도 불구하고, 측정상의 어려움으로 인하여 딴플의 구체적인 항력 감소 메커니즘이나 거친 표면을 가지는 구와의 유동특성 차이는 명확히 제시되지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 딴플의 항력감소 메커니즘을 밝히기 위하여 딴플과 표면거칠기가 설치된 구의 항력 및 표면압력을 측정하였고 표면가시화를 수행하였으며 열선 유속계를 이용한 딴플과 표면거칠기 주위의 주유동 속도를 측정하였다.

## 2. 실험장치

본 실험은 600x600mm 크기의 개방형 실험부를 가지는 풍동에서 수행되었다. 딴플이 설치된 구의 경우 RP (Rapid Proto)가공으로 만들어 졌으며 딴플의 크기와 배열은 실제 골프공 (TITLEIST DT-Distance)과 같은 구조를 가지는 3.5배의 크기로 제작하였으며 딴플의 크기는 Fig. 2 와 같다. 구의 지름은 150mm 이며, 레이놀즈 수는  $0.5 \times 10^5 \sim 2.8 \times 10^5$  이다. 항력은 구의 내부에 직접 로드셀을 부착하여 측정하였으며 48 개의 압력 구멍을 설치하여 구의 표면 압력을 측정하였다. 주박리점을 측정하기 위하여 오일에 티타늄 다이옥사이드를 첨가한 물질을 이용하여 표면 가시화를 시행하였다. 구 주위 유동의 주유동 속도를 측정하기 위하여 I형 열선유속계를 32 kHz 의 해상도로 사용하였으며 경계층의 정밀한 측정을 위하여 0.02mm 단위의 스텝핑 모터를 이용하였다. 표면 거칠기가 설치된 구는 NC로 가공된 매끈한 150mm 지름의 구 표면에 지름 1mm 의 구를 부착하여 제작하였으며 딴플이 설치된 구의 실험과 같은 실험을 반복하였다.

## 3. 결과

Fig. 1 은 딴플과 표면 거칠기가 설치된 구의 항력계수를 측정된 결과다. 딴플이 설치된 구의 경우 레이놀즈 수가 증가함에 따라 항력계수가 빠르게 감소한 후에 비교적 일정한 값을 유지하였으며 이러한 경향은 Bearman & Harvey<sup>1</sup>의 결과와 일치하였다. 임계 레이놀즈 수와 최소 항력계수의 차이는 딴플의 깊이가 그들의 실험 조건에 비하여 2배 가량 작기 때문이다. 거친 표면을 가지는 구의 경우 레이놀즈 수가 급격하게 감소한 후 딴플과는 달리 다시 빠르게 증가하는 경향을 보였다. 이러한 항력계수의 경향 차이는 딴플과 표면 거칠기가 유

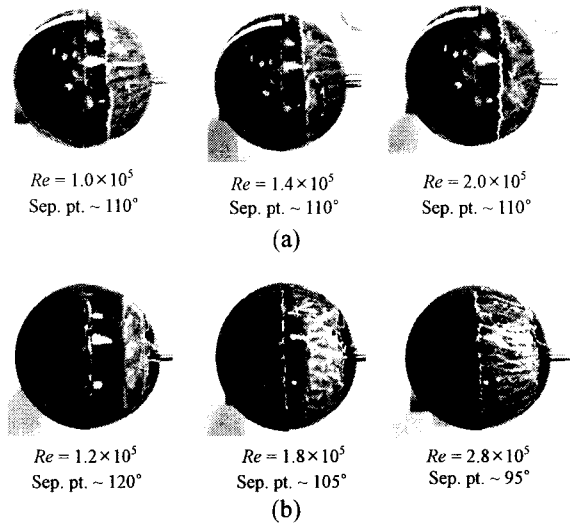


Fig. 3 Surface visualization of separation point using oil-flow pattern: (a) dimpled sphere; (b) roughened sphere

동에 많은 차이를 주는 것을 암시한다. 표면 거칠기가 있는 구의 경우 임계 레이놀즈 수 이후 레이놀즈 수 증가에 따라 주박리점이 상류로 이동하는 것은 Achenbach<sup>2</sup> 가 압력측정과 터프트 가시화를 통하여 보여 준 바 있으나, 딴플이 있는 구의 경우 아직까지 누구도 주 박리점의 변화에 대한 측정은 하지 못하고, 단지 일정한 항력계수 값으로 미루어 보아 주박리점이 일정하게 유지가 될 것이라고 예상하였다.

따라서, 항력계수에 큰 영향을 미치는 주박리점의 측정을 위하여 오일을 이용한 표면 가시화를 수행하였다. 그러나 딴플과 표면 거칠기가 있는 조건에서는 오일의 이동에 방해가 되어 정확한 박리점을 측정할 수가 없었다. 따라서 박리점이 발생하는 90° 이후에는 매끈한 구로 대체하였으며 이로 인한 유동 특성의 차이를 확인하기 위하여 각각 항력계수를 다시 측정하였다. 딴플의 반만 설치된 구의 경우 항력계수의 변화가 거의 없었고 거칠기의 반만 설치된 구의 경우 항력계수의 변화가 다소 있었으나, 임계 레이놀즈 수 이후 항력이 증가하는 추세는 비슷하였다.

표면 가시화 결과는 Fig. 3 과 같다. 딴플이 있는 구의 경우 임계 레이놀즈 수 이후의 주 박리점은 레이놀즈 수에 관계 없이 약 110°로 유지되었으며 이로 인하여 항력계수가 일정하게 유지됨을 설명할 수 있다. 또한 표면이 거친 구의 경우 임계 레이놀즈 수 이후 주박리점이 상류로 이동함을 알 수가 있는데, 이때 압력이 낮은 후면 면적이 넓어짐에 따라 급격하게 항력계수가 증가하는 것을 알 수 있다.

레이놀즈 수에 따른 항력계수의 거동이 다르게 나타나는 이유에 관하여 자세한 분석을 하기 위하여 열선 유속계를 이용한 주유동 속도를 측정 결과는 Fig. 4 와 같다. 정체점으로부터 60°~115°에서 두 개의 유선 방향을 따라 측정하였다. 레이놀즈 수  $1.0 \times 10^5$ 의 딴플 III의 경우 경계층의 속도가 딴플의 입구 벽면 근처에서 매우 작은 값으로 유지가 되는 것을 볼 수 있는데 이것은 그 지점의 유동이 박리되었다는 것을 알려 준다. 박리된 점은 딴플이 끝나는 지점에 가서 재 부착이 되며 이러한 현상은 하나의 박리기포를 형성한다. 박리기포의 상부에서는 전단층의 불안정성으로 인하여 난류강도가 급격하게 증가함을 알 수 있으며 이는 난류로의 천이를 암시한다. Fig. 5는 딴플 II, III 에서의 에너지 스펙트럼을 보여준다. 딴플

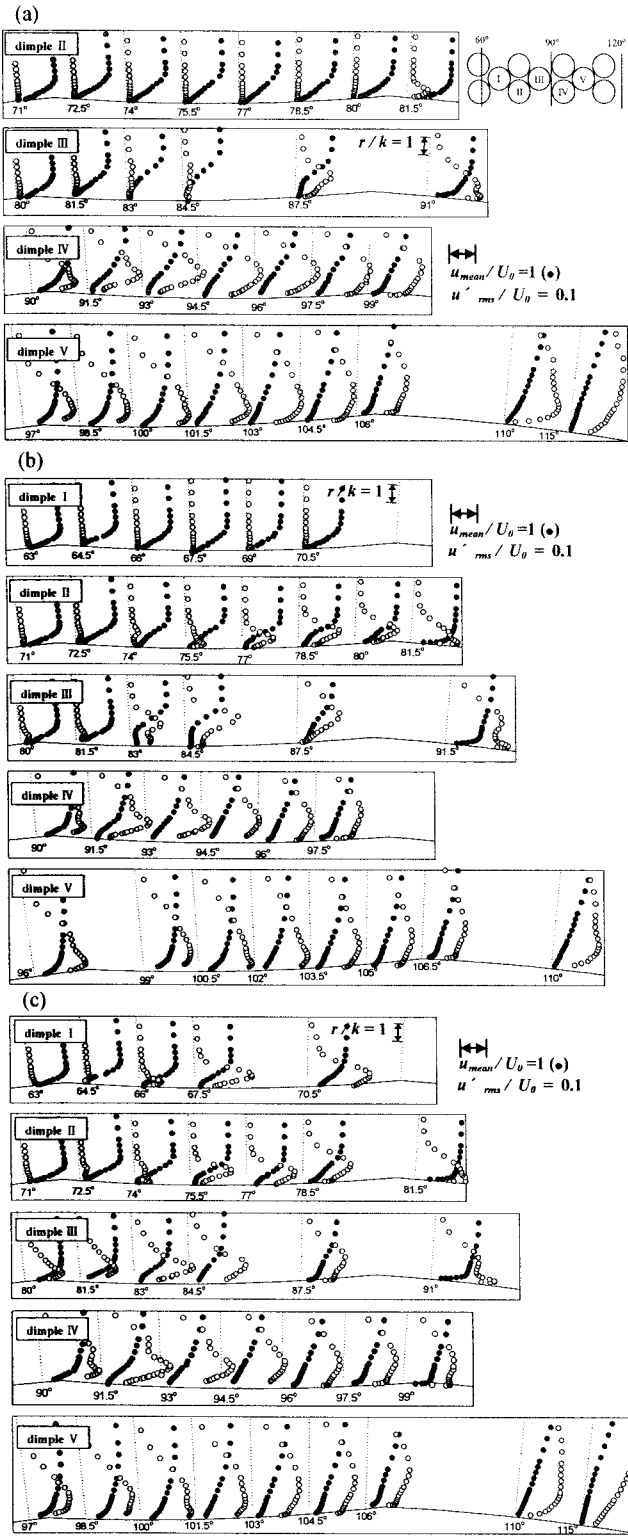


Fig. 4 Profiles of the mean streamwise velocity (●) and rms streamwise velocity fluctuation (○) near the dimpled sphere: (a)  $Re = 1.0 \times 10^5$ ; (b)  $Re = 1.5 \times 10^5$ ; (c)  $Re = 2.0 \times 10^5$

II에서는 에너지 스펙트럼이 층류의 특징을 가지고 있으나 딴플 III에서는 난류의 특징인 높은 에너지 레벨의 고주파 특성을 가지고 있다. 따라서 딴플이 있는 구 주위의 경계층 천이 는 딴플 내부에 존재하는 박리기포에서 발생함을 알 수 있다. 한편 박리기포에서 난류로 천이된 경계층은 벽 근처에서 높은 운동량을 갖게 되고 이는 구의 후면에 존재하는 역압력 구배 를 극복할 수 있는 원인이 된다. 따라서 주박리점이 지연되어

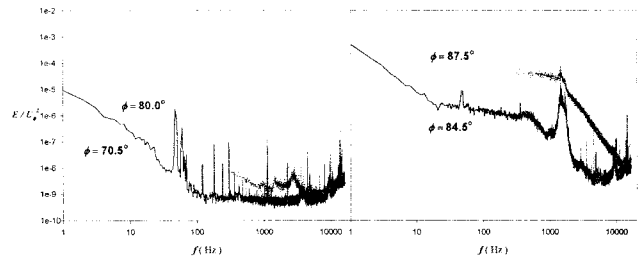


Fig. 5 Energy spectra of the streamwise velocity at the radial location of maximum rms velocity fluctuations near the dimple II and III for  $Re = 1.0 \times 10^5$

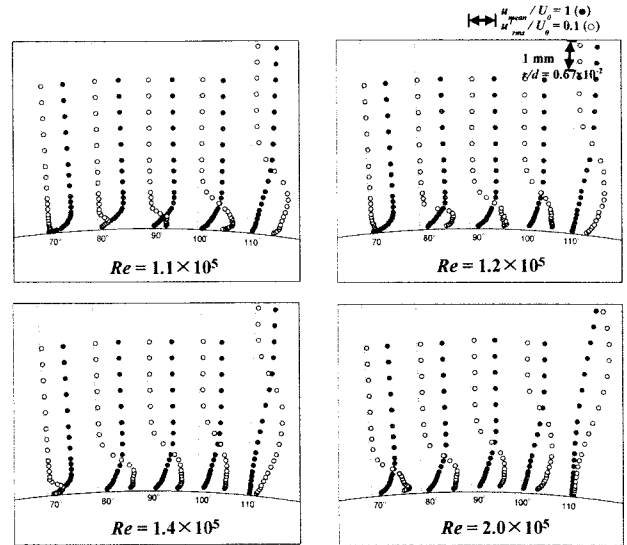


Fig. 6 Profiles of the mean streamwise velocity (●) and rms streamwise velocity fluctuation (○) near the roughened sphere

항력계수가 감소한다. 레이놀즈 수  $1.5 \times 10^5$ 이 되면 박리가 발생하는 딴플의 위치는 약간 더 상류에 존재하게 되어 박리기포가 존재하는 딴플은 II, III, IV가 되며 마찬가지로 경계층의 벽면에 운동량을 공급하여 박리를 지연시키는 역할을 한다. 레이놀즈 수가 더욱 증가하면 박리기포가 발생하는 지점은 더욱 상류로 이동한다. 그러나, 마지막 박리기포가 발생하는 지점은 언제나 딴플 IV로 유지된다. 따라서 난류로의 천이가 더욱 상류에서 발생함에도 불구하고 경계층에 에너지를 공급해주는 박리기포가 존재하는 딴플의 위치는 일정하게 유지되기 때문에 주박리점은 일정하게 유지되며 그 결과 항력계수 또한 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 선행연구들에서 제시하였던 일정한 천이 발생 지점이 일정한 항력계수를 유도한다는 가설과는 다른 결과이다.

표면 거칠기가 있는 구의 경우 (Fig. 6), 경계층은 박리기포 같은 현상 없이 표면 거칠기에서 직접 영향을 받아 난류로 천이 된다. 레이놀즈 수가  $1.1 \times 10^5$ 일 경우 천이는 대략  $90^\circ$  부근에서 발생하며 그 이후 역압력 구배의 영향을 받아 경계층의 두께가 두꺼워지는 한편 전형적인 난류경계층의 형상을 지닌다. 레이놀즈 수가 증가하면 천이가 발생하는 지점은 점점 상류로 이동하며 이에 따라 더욱 더 빠른 속도로 경계층의 두께가 증가한다. 따라서 주박리점은 상류로 이동하여 항력계수가 증가하게 된다.

#### 4. 결론

## 후 기

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

## 참고문헌

- [1] Bearman, P. W. and Harvey, J. K., 1976, "Golf ball aerodynamics," *Aeronautical Quarterly*, May, pp. 112-122.
- [2] Achenbach, E., 1974, "The effect of surface roughness and tunnel blockage on the flow past spheres," *J. Fluid Mech.* Vol. 65, pp. 113-125.
- [3] Maxworthy, T., 1969, "Experiments on the flow around a sphere at high Reynolds numbers," *J. Appl. Mech. Trans. ASME.*, E36, pp. 598-607.
- [4] Nakamura, Y. and 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.
- [5] Bearman, P. W. and Harvey, J. K., 1993, "Control of circular cylinder flow by the use of dimples," *AIAA J.*, Vol. 31, pp. 1753-1756.
- [6] Ligrani, P. M., Harrison, J. L., Mahmmod, G. I. and Hill, M. L., 2001, "Flow structure due to dimple depressions on a channel surface," *Phys. Fluids*, Vol. 13, pp. 3442-3451.
- [7] Jeon, S., Choi, J., Jeon, W. -P., Choi, H. and 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.
- [8] Suryanarayana G. K. and Prabhu, A., 2000, "Effect of natural ventilation on the boundary layer separation and near-wake vortex shedding characteristics of a sphere," *Exp. Fluids*, Vol. 29, pp. 582-591.
- [9] Achenbach, E., 1972, "Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 54, pp. 565-575.
- [10] Choi, J., Jeon, W. -P. and Choi, H., 2006, "Mechanism of drag reduction by dimples on a sphere," *Phys. Fluids*, Vol. 18, 041702.

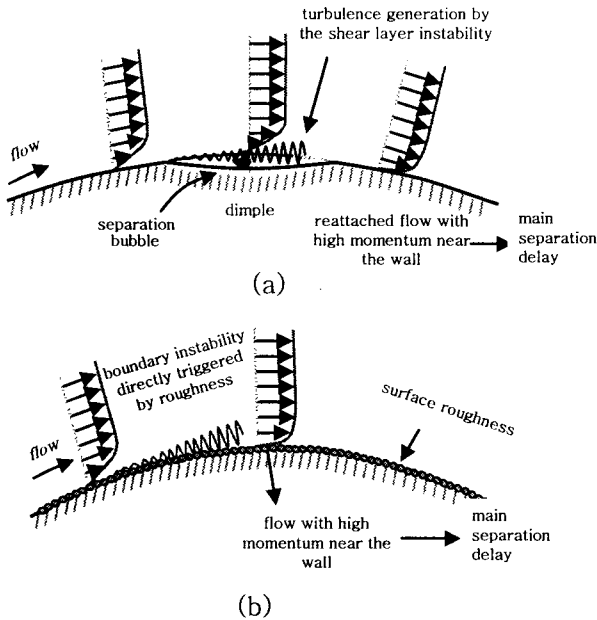


Fig. 7 Schematic of drag reduction mechanisms of (a) dimpled sphere; (b) roughened sphere

본 연구에서는 열선 유속계를 이용한 구 주위 경계층 속도 측정을 통하여 덤플과 표면 거칠기가 있는 구의 항력 감소 메커니즘을 규명하였다. 덤플이 있는 구의 경우 난류로의 천이가 항력감소의 주요 원인인데, 난류로의 천이는 덤플에서 발생하는 국소 박리를 따라 전단층 불안정성으로 인해 발생한다. 레이놀즈 수가 증가하면 난류로 천이하는 지점은 상류로 이동하지만, 마지막으로 재부착되는 덤플의 위치가 일정하게 유지되기 때문에 주박리점이 고정되고 낮은 항력계수를 유지할 수 있게 한다 (Fig. 7a). 표면 거칠기가 있는 구의 경우, 표면 거칠기가 직접 경계층을 난류로 천이 시키며 레이놀즈 수가 증가함에 따라 천이점은 상류로 이동한다. 이때 표면 거칠기는 경계층을 더욱 더 두껍게 만들기 때문에 주박리점은 상류로 이동하며 이에 따라 빠른 항력계수의 증가를 보인다 (Fig. 7b).