

# 축 방향으로 나열된 관통홀을 구비한 원형 실린더 주위 유동

김지희\* · 채석봉\* · 김주하†

## Flow around a circular cylinder with axially arranged holes

Jihee Kim\*, Seokbong Chae\* and Jooha Kim†

**Abstract** In the present study, we experimentally investigated the flow around a circular cylinder with axially arranged holes (AAH). The wind-tunnel experiment was performed at  $Re = 3.2 \times 10^4$  while varying the angle of attack ( $\alpha$ ) from  $0^\circ$  to  $90^\circ$ . At low  $\alpha$ , the passive jet from the AAH pushes near wake to the downstream, increasing the wake formation length. On the other hand, at high  $\alpha$ , blowing and suction through AAH occurs alternatively, rather decreasing the wake formation length. The passive jet generated by AAH can effectively control not only the wake where AAH is located, but also the wake between holes. As a result, the AAH reduce the drag on the cylinder up to 23.8% at low  $\alpha$  but rather increase the drag at high  $\alpha$ , as compared to that on a smooth cylinder.

**Key Words** : Cylinder(실린더), Drag(항력), Passive jet(수동 제트), Wake(후류)

### 1. 서론

몽특한 형상 주위의 유동에 대한 이해는 전통적인 유체역학의 문제일 뿐 아니라 다양한 공학적 활용도를 갖기 때문에 매우 중요하다. 몽특한 형상 중 원형 실린더는 가장 단순한 2차원 형상을 갖기 때문에 매우 중요하게 다뤄지고 있다. 특히, 유동으로부터 유도되는 실린더 형상의 물체에 작용하는 힘, 실린더 표면에서의 유동 박리

로 인한 와류 방출(vortex shedding) 패턴, 유동의 불안정성에 의한 와유기 진동(VIV; Vortex Induced Vibration) 등의 제어는 수많은 연구자들의 관심사가 되어왔다. 이와 같은 목적을 달성하기 위해 제시된 다양한 유동 제어 방법들은 일반적으로 능동적 제어와 수동적 제어의 두 가지로 크게 분류할 수 있다. 두 방법의 주요 차이점은 추가적인 에너지 공급 필요성의 유무이다. 전형적인 능동적 제어 방법으로는 합성 제트를 사용한 경계층 흡입 및 배출<sup>(1)</sup>, 회전하는 막대의 사용<sup>(2)</sup>, 전자기력 제어법<sup>(3)</sup> 등이 있다. 수동적 제어 방법의 경우, 주로 구조물의 형상을 바꾸거나 알맞은 장치를 추가함으로써 이루어지며, 그 방법에는 표면의 거칠기 조절<sup>(4)</sup>, 난류 발생 장치 부착<sup>(5)</sup>, 분할판(splitter plate) 부착<sup>(6)</sup>, 수동 제트(passive jet)<sup>(7)</sup> 등이 있다.

수동제트는 에너지 공급 없이 물체의 가까운

---

† Department of Mechanical Engineering,  
Ulsan, 44919, Korea National Institute of  
Science and Technology, Assistant professor  
E-mail: kimjooaha@unist.ac.kr

\* Department of Mechanical Engineering,  
Ulsan, 44919, Korea National Institute of Science  
and Technology, Graduate student  
(Combined master's-PhD)

후류 지역으로 유체를 주입하는 방법으로 뚫은 형상 주위의 유동제어에 효과적인 것으로 알려져 있다. 수동제트를 적용하여 근접 후류 지역의 압력이 증가하면 물체의 전면과 후면 사이의 압력 차이가 줄어들면서 항력을 줄일 수 있다<sup>(8-11)</sup>. 기존의 수동제트는 대부분 실린더의 길이 방향으로의 변화가 없는 2차원 형상의 슬롯으로 구성되며, 이러한 경우 슬롯과 자유유동속도가 이루는 각도의 변화에 따라 항력이 오히려 증가할 수 있다는 단점을 갖는다.

최근, 본 연구실에서는 실린더에 슬롯 대신 축 방향으로 나열된 관통홀(AAH; Axially Arranged Holes)을 설치하면 더욱 안정된 구조를 가지면서도 더 넓은 범위의 유동방향에 대해 항력을 감소시키면서 기존의 슬롯이 갖는 단점을 보완할 수 있다는 것을 확인한 바 있다<sup>(12)</sup>. 따라서 본 연구에서는 축 방향으로 나열된 관통홀이 구비된 원형 실린더 주위 유동특성을 면밀히 살펴보고자 한다. 이를 위해 풍동실험을 통해 관통홀이 구비된 원형 실린더 주위 유동특성을 기본적인 원형 실린더와 비교하였으며, 다양한 유동 방향에 따른 유동 패턴 변화 또한 살펴보았다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실린더 모델

Fig. 1(a)는 본 연구에서 사용된 실린더 모델을 정면에서 바라본 개략도이다. 본 연구에서는 축 방향으로 배열된 관통홀을 구비한 실린더 모델과 매끈한 실린더 모델이 사용되었다. 실린더는 지름 ( $D$ ) 50 mm, 높이 494 mm이며, CNC 기계를 사용하여 ABS 수지로 만들어졌다. 실린더의 지름으로 무차원화한 관통홀의 지름( $d_h/D$ )은 슬롯을 이용하여 수동제트를 구성했던 Gao et al.<sup>(11)</sup>의 무차원화된 슬롯 너비를 참고하여 유사하게 실린더 지름의 10% ( $d_h/D=0.1$ )로 설정하였다. 또한, 이웃한 관통홀 중심 사이의 거리는 관통홀 지름의 1.8 배( $s_h/d_h=1.8$ )로 일정하게 유지하였으며, 축방향으로 배열된 관통홀들의 전체 길이( $l_h$ )는 두 end plate 사이의 거리보다 길게

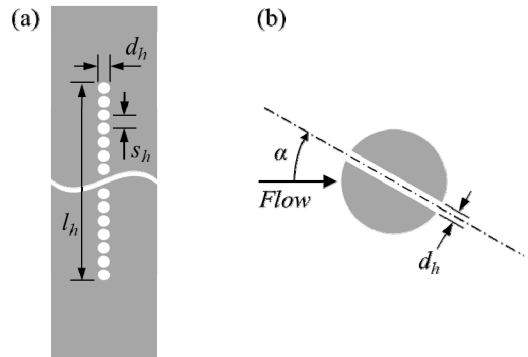


Fig. 1. (a) Schematic front view of the circular cylinder with axially arranged holes (AAH). (b) Cross-sectional view of the cylinder with AAH through the center of a hole.

제작되었다. Fig. 1(b)와 같이, 관통홀 실린더의 받음각( $\alpha$ )은 유동방향과 관통홀의 중심축 사이의 각도로 정의된다. 본 연구에서는 받음각을  $0^\circ$ 에서  $90^\circ$ 까지  $10^\circ$  간격으로 변화시키며 실험을 진행하였다.

### 2.2 항력 측정 장치

Fig. 2는 실린더 모델에 작용하는 항력을 측정하기 위한 장치의 개략도이다. 본 실험은 최대 풍속이 45m/s이며 폭 0.5m, 높이 0.5m, 길이 1.2m의 시험부를 가진 폐회로형 풍동에서 진행되었다. 본 실험장치의 차폐율은 10%이며 차폐 효과를 보상하기 위해 Allen and Vincenti<sup>(13)</sup>, Dalton<sup>(14)</sup> 등이 제안한 방법으로 측정 데이터를 보정하였다. 실린더 모델은 샤프트를 통해 풍동 시험부에 고정하였다. 풍동 윗 벽과 아랫 벽에는 유동의 벽면효과를 제거하기 위해 각 벽면에서 37 mm 떨어진 곳에 타원 형태의 선단을 가진 end plate를 설치하였다. End plate와 실린더 사이의 틈에 의한 유동 유출을 최소화하기 위해 end plate의 구멍은 실린더 표면과 닿지 않으면서 가능한 작게 설계하였다. 두 end plate 사이의 거리는 416 mm이며, 이에 따른 실린더 모델의 종횡비( $L/D$ )는 8.32이다. Szepeszy and Bearman<sup>(15)</sup>에 따르면 두 end plate간의 거리가 5D에서 10D 사이에 있으면 종횡비에 따른 효과를 제거하기에

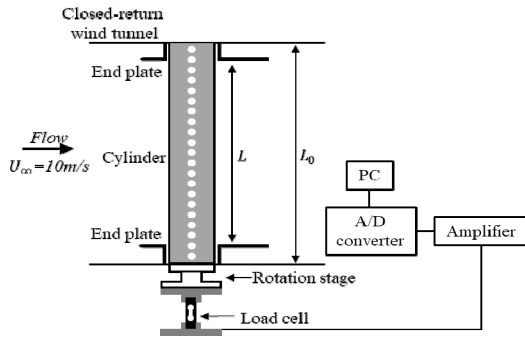


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup for the force measurement.

충분하다. 실린더 모델의 아래쪽 부분은 회전스테이지와 연결되어 있고, 회전스테이지는 로드셀(CAS BCL-3Ls)과 연결되어 있어 다양한 받음각에서의 항력을 측정할 수 있도록 설계되었다. 로드셀로부터 측정된 데이터는 증폭기와 A/D 변환기를 거쳐 PC로 보내져 분석된다. 레이놀즈 수는  $Re = U_\infty D / \nu$  ( $U_\infty$ , 자유유동속도;  $D$ , 실린더 지름;  $\nu$ , 공기의 동점성계수)로 정의하여  $Re = 3.2 \times 10^4$ 에서 실험을 수행하였다.

## 2. 속도장 측정 장치

항력 측정과 더불어 받음각에 따른 다양한 유동특성을 살펴보기 위해 다양한 받음각( $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 70^\circ, 90^\circ$ )에 대하여 속도장을 측정하였다. Fig. 3(a)는 실린더 모델의 속도장 측정을 위해 수행한 입자영상유속계(Particle Image Velocimetry; PIV)의 개략도이다. 본 실험 장치는 Nd:YAG 레이저, CCD카메라, Timing hub, 실린더 모델로 구성되고, 레이저 반사용 거울을 사용하여 실린더 모델의 그림자에 의해 레이저가 가려지는 현상을 줄였다. 이 때, 레이저로부터 조사된 레이저 평면과 거울에 반사된 레이저 평면이 동일 평면상에 위치하도록 하여 레이저 반사용 거울 사용에 따른 중복 영역 발생에 대한 오차를 최소화하였다. FOV(Field of View)는  $190 \text{ mm} \times 190 \text{ mm}$ 이고, one-quarter rule에 따라 이미지 사이의 시간간격을  $40 \mu\text{s}$ 로 설정하였다. 이때 interrogation window size는  $32 \text{ pix.} \times 32 \text{ pix.}$ 로 설정되었다. 예

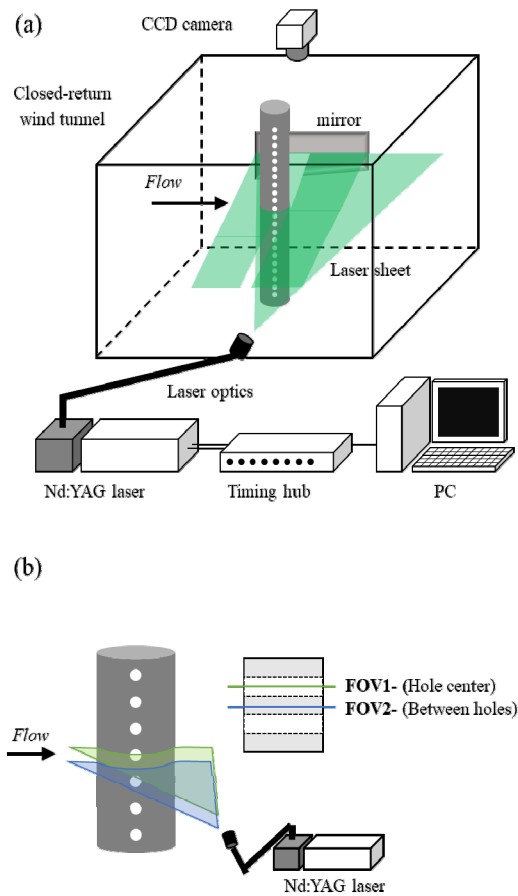


Fig. 3. (a) Schematic diagram of the setup for the PIV measurement. (b) Location of two fields of view (FOV). The green plane represents the FOV1, and the blue plane represents the FOV2 which is parallel to FOV1.

러 벡터는  $3 \times 3$  window의 표준 편차의 3배보다 큰 벡터를 제거하는 로컬 중앙값 필터를 사용하여 검출되었으며, 제거된 벡터는 이웃하는 벡터들로부터 각 방향으로의 선형 보간에 의해 생성된 벡터로 대체되었다. 또한 5000장의 순간 유동장 이미지를 9Hz로 측정하였고, 이를 평균하여 충분히 수렴된 평균 속도, 평균 평방근(root mean square) 그리고 평균 와도 값을 얻었다. Fig. 3(b)와 같이, 관통홀 실린더의 경우, 관통홀의 중심을 지나는 평면(FOV1)과 관통홀과 관통홀 사이를 지나는 평면(FOV2)에 대한 유동 가시화가 진행되었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 항력 측정 결과

Fig. 4는 받음각의 변화에 따른 축 방향으로 배열된 관통홀(AAH)을 구비한 실린더의 항력계수를 매끈한 실린더와 비교하여 나타낸 것이다. 매끈한 실린더의 평균 항력계수  $\overline{C_D}$ 는 받음각에 상관없이 1.0으로 일정하다. 관통홀 실린더의 경우, 낮은 받음각의 범위( $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ )에서  $\overline{C_D}$ 가 매끈한 실린더에 비해 확연히 감소하였다. 이를 통해 AAH가 항력 감소를 위한 효과적인 유동 제어기 범임을 알 수 있다. 특히,  $\alpha$ 가  $0^\circ$ 인 경우, 최대 23.8%의 항력 저감이 이루어 졌으므로 단순히 유동방향과 평행하게 관통홀을 생성하는 것만으로 효과적인 유동제어가 가능하다는 것을 확인하였다. AAH의 항력 저감효과는  $40^\circ$  이하의 받음각에서 받음각이 증가할수록 감소하며, 이러한 항력 저감특성의 원인은 3.2에서 속도장을 통해 살펴볼 것이다. 한편, 받음각이 더 많이 증가하게 되면 항력계수는 계속해서 증가하는 추세를 보이며, 심지어 매끈한 실린더보다 높은 항력계수 값을 갖게 된다. 본 실험에서는  $\alpha$ 가  $90^\circ$ 일 때 항력계수가 가장 높았으며, 이때 29.5%의 항력이 증가하였다.

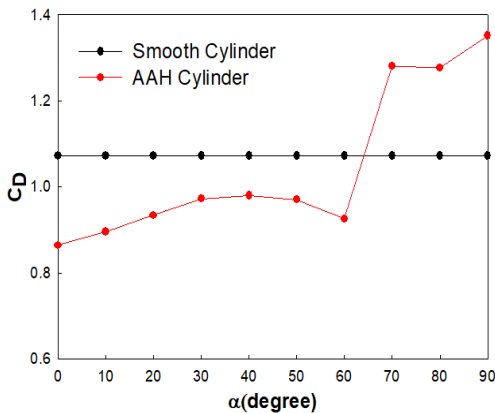


Fig. 4. Variations of drag coefficient with respect to the angle of attack( $\alpha$ ).

#### 3.2 속도장 측정 결과

Fig. 5는 매끈한 실린더 및 관통홀 실린더의  $\alpha$ 가  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $90^\circ$ 일 때 FOV1에 대한 평균 와도장을 나타낸 것이다. 실린더에 설치된 AAH는 관통홀 양 끝의 압력 차이에 의해 추가적인 에너지 공급이 필요 없는 수동제트를 생성한다. 받음각이  $0^\circ$ 일 때 관통홀 실린더의 FOV1에 대한 평균 와도장을 살펴보면(Fig. 5(b)), 관통홀 실린더 표면에서 박리된 유동의 전단층과 관통홀의 수동제트로부터 생성되는 전단층을 모두 확인할 수 있다. 높은 압력의 풍상측(windward)에서 낮은 압력의 풍하측(leeward)으로 발생하는 수동제트가 관통홀 실린더의 후류를 뒤로 밀어 내면서 관통홀 실린더의 전단층이 매끈한 실린더의 전단층보다 더 하류에 위치하는 것을 볼 수 있다. 받음각이  $10^\circ$ 로 증가하게 되면(Fig. 5(c)), 수동제트가 여전히 존재하지만 관통홀의 풍상측

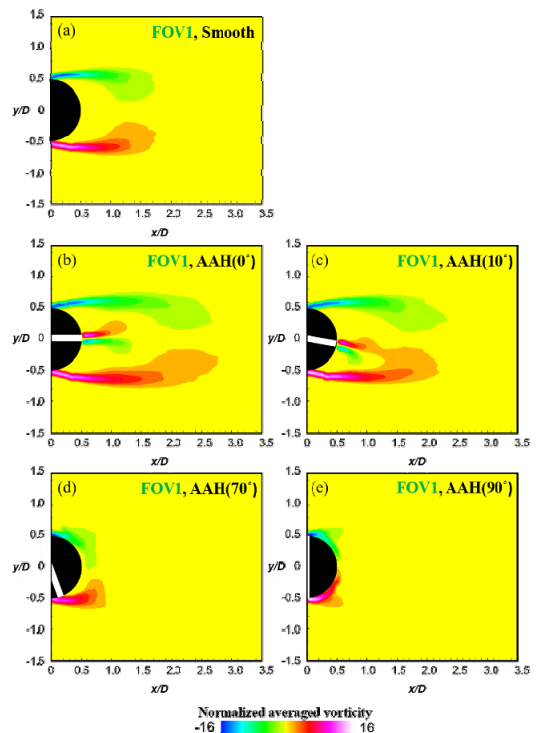


Fig. 5. Normalized mean vorticity contours in FOV1 for (a) Smooth cylinder, and AAH cylinder at (b)  $\alpha = 0^\circ$ , (c)  $10^\circ$ , (d)  $70^\circ$ , and (e)  $90^\circ$ .

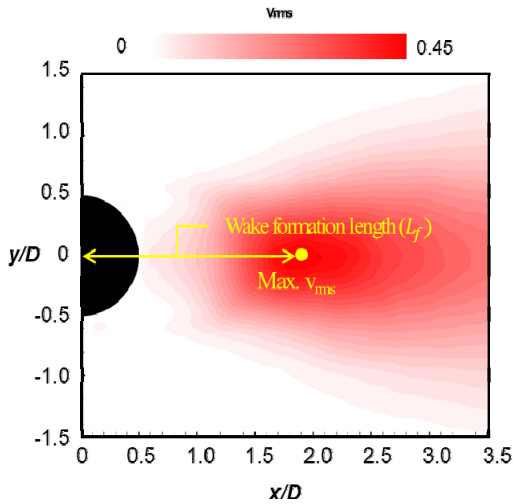


Fig. 6. Definition of the wake formation length ( $L_f$ ).

과 풍하측 사이의 압력 차이가 감소함에 따라 수동제트의 운동량도 감소하여 후류유동의 제어 효과가 줄어들게 된다. 따라서, 관통홀 실린더에서 박리되는 유동의 전단층이 매끈한 실린더에 비해서는 뒤로 밀려나지만 받음각이  $0^\circ$  일 때 보다는 덜 밀려나는 것을 확인하였다. Fig. 5(d), (e)는 관통홀 실린더의 받음각이  $70^\circ$ 와  $90^\circ$ 일 때 FOV1에 대한 평균 와도장을 나타낸다. 받음각이 높아짐에 따라, 수동제트에 의한 전단층은 거의 사라지게 되고, 실린더에서 박리된 전단층만 확인할 수 있다. 또한, 낮은 받음각의 경우에 비하여 전단층이 실린더 표면 근처에서 형성되며, 특히 받음각이  $90^\circ$ 일 경우는 전단층이 실린더 표면에 바로 붙어서 형성된다.

이와 같은 현상은 실린더의 후류 형성 길이 ( $L_f$ ; wake formation length)에 영향을 준다. 후류 형성 길이는 Fig. 6에 도시한 바와 같이 횡방향 속도의 평균 평방근 분포에서의 극소 최댓값과 실린더 중심 사이의 수평 거리로 정의하였다. 측정된 후류 형성 길이는 실린더의 지름으로 무차원하여 Fig. 7에 나타내었다. 일반적으로, 실린더의 전단층으로부터 생성되는 보텍스 중심이 실린더 뒤쪽 표면으로부터 멀리 떨어져 형성될수록 실린더의 풍상측과 풍하측간의 압력차가 줄어들어 실린더가 받는 항력이 감소한다. Fig. 7에

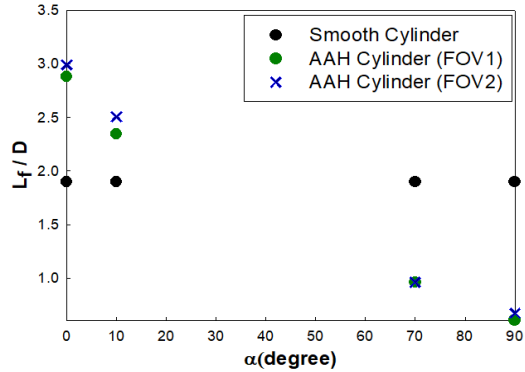


Fig. 7. Variations of the normalized wake formation length with respect to the angle of attack.

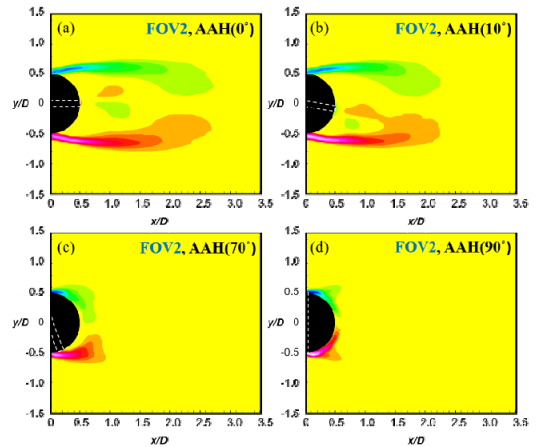
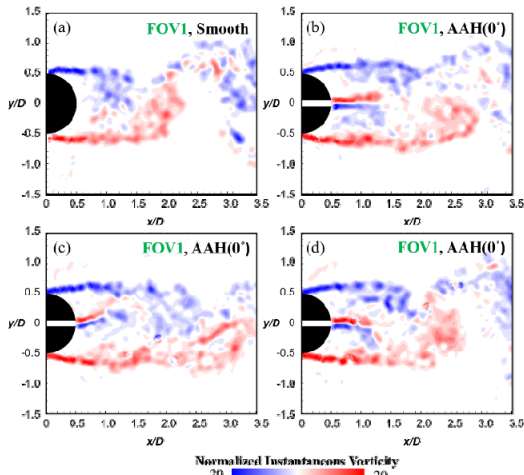
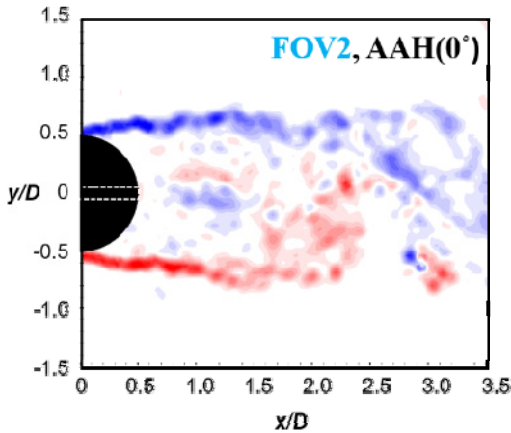


Fig. 8. Normalized mean vorticity contours in FOV2 for AAH cylinder at (a)  $\alpha = 0^\circ$ , (b)  $10^\circ$ , (c)  $70^\circ$ , and (d)  $90^\circ$ . The contour level is same with Fig. 5.

도시한 바와 같이 관통홀 실린더의 받음각이 증가함에 따라 후류 형성 길이가 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 매끈한 실린더의 후류 형성 길이를 기준으로, 낮은 받음각의 범위에서는 관통홀 실린더의 후류 형성 길이가 더 크지만, 높은 받음각의 범위에서는 오히려 관통홀 실린더의 후류 형성 길이가 더 작음을 확인하였다. 이로부터 3.1에서 확인한 관통홀 실린더의 항력 측정 결과를 설명할 수 있다. Fig. 8은 관통홀과 관통홀 사이의 평면인 FOV2에 대한 평균 와도장을 나타낸 것이다. 특이한 점은 실제 관통홀이

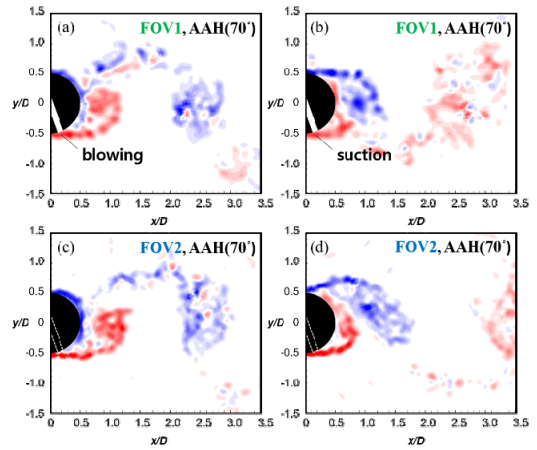


**Fig. 9.** Instantaneous vorticity contour for (a) Smooth cylinder, and AAH cylinder at  $\alpha=0^\circ$  for (b) symmetric mode, (c) upper deflected mode, (d) lower deflected mode. All contours were taken in FOV1.



**Fig. 10.** Instantaneous vorticity contour for AAH cylinder at  $\alpha=0^\circ$  in FOV2. The contour level is same with Fig. 9.

없음에도 불구하고, 모든 받음각에 대하여 관통홀이 있을 때의 평균 와도장과 크게 다르지 않다는 것이다. 이는 관통홀에 의해 발생한 수동 제트가 관통홀이 위치한 스핀방향 위치의 후류는 물론 관통홀과 관통홀 사이의 후류까지도 효과적으로 제어할 수 있음을 의미한다. 특히, Fig. 8(a), (b)의 경우, 수동 제트에 의한 전단층은 뚜



**Fig. 11.** Instantaneous vorticity contour for AAH cylinder at  $\alpha=70^\circ$  in FOV1: (a), (b) and FOV2: (c), (d). The contour level is same with Fig. 9.

렷하게 보이지 않지만, 관통홀 실린더의 전단층은 후류쪽으로 밀려나 형성되었다. 이는 Fig. 7의 FOV2로부터 구한 후류 형성 길이의 결과와 유사하다는 것을 통해 다시 확인할 수 있다.

관통홀 실린더의 받음각에 따른 유동의 특성을 더 자세히 알아보기 위해 순간 와도장을 분석하였다. Fig. 9(a)는 매끈한 실린더의 순간 와도장이며, 실린더 전단층으로부터 생성되는 카르만(Kármán) 보텍스를 확인할 수 있다. Fig. 9(b), (c), (d)는 받음각이  $0^\circ$ 일 때 FOV1 평면 위의 순간 와도장을 나타낸 그림이다. 관통홀에서 생성된 수동제트가 카르만 보텍스 구조를 밀어내에 따라 카르만 보텍스의 요동치는 정도가 줄어든 것을 볼 수 있으며, 따라서 실린더의 양력 섭동도 감소할 것으로 예상된다. 이 때, 수동제트의 보텍스가 실린더 전단층 보텍스와 상호작용하며 간헐적으로 위쪽, 아래쪽, 그리고 유동방향으로 방향을 바꾸는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 flip-flop이라 불리며, 주로 틈(gap)이 있는 두 뭉툭한 물체의 후류가 쌓을 이루게 되면서 발생하게 된다<sup>(16-19)</sup>. 반면, FOV2의 경우 실린더 전단층의 보텍스가 FOV1과 같이 후류로 밀려나지만, 수동 제트 유동은 없기 때문에 Fig. 10과 같

이 flip-flop 현상이 나타나지 않는 것을 확인하였다. Fig. 11은 관통홀 실린더의 항력이 매끈한 실린더보다 높아지는 구간인 받음각이  $70^\circ$ 일 때의 순간 와도장을 보여준다. 받음각이  $70^\circ$ 로 증가하면, 실린더 표면의 압력 분포에 따라 관통홀의 출 입구 간의 압력차이가 줄어든다. 그 결과, 관통홀 출 입구쪽 경계층의 흡입과 배출이 반복되면서 흡입이 일어나는 쪽의 보텍스가 실린더 표면에 부착되고, 배출이 일어나는 쪽의 보텍스가 바로 뒤쪽으로 형성되는 것을 확인하였다. 또한, Figs. 11(c), (d)와 같이 FOV2에서도 유사한 형태의 보텍스 구조가 형성됨을 알 수 있다. 이를 통해 높은 받음각에서 후류 형성 길이가 현저히 짧아지는 이유를 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 축 방향으로 배열된 관통홀이 설치된 원형 실린더 주위의 유동 특성을 살펴보았다. 이를 위해 풍동 실험을 통해 항력을 직접 측정하였고, 여러 유동 방향에 대한 관통홀의 효과를 규명하기 위해 관통홀의 받음각을 다양하게 바꿔가며 속도장을 측정하였다. 낮은 받음각의 경우( $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ ), 관통홀로부터 생성되는 수동 제트의 영향으로 후류 형성 길이가 길어졌으며, 이에 따라 매끈한 실린더에 대비하여 항력이 감소하였다.  $\alpha = 0^\circ$ 일 때 FOV1에서는 수동 제트 유동이 임의의 방향으로 휘어지면서 양 옆의 전단층과 붙었다 떨어졌다를 반복하는 현상 (flip-flop)을 관찰하였고, 이 현상은 FOV2에서는 나타나지 않았다. 반면, 높은 받음각의 경우( $70^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ ), 관통홀을 통한 유동이 흡입과 배출을 반복하면서 후류 형성 길이가 짧아졌으며, 이에 따라 매끈한 실린더에 대비하여 항력이 증가하였다. 또한,  $\alpha = 70^\circ$ 인 경우 순간 와도장으로부터 경계층 흡입부 쪽의 유동 박리점이 상당히 지연되는 것을 확인하였고, 이와 동시에 경계층 배출부 쪽에서 다른 강한 보텍스가 생성되는 것을 FOV1, FOV2 모두에서 확인하였다.

차후에는 관통홀의 형상과 관련된 여러 매개 변수(예: 관통홀의 지름, 관통홀 사이의 거리 등)

가 후류 유동제어에 미치는 효과를 살펴보는 것이 필요할 것으로 생각된다. 또한, 본 연구에서 다른 유동제어 기법에는 항력을 감소시킬 수 있는 유효 받음각이 존재하고, 유효 받음각의 크기에 따라 그 효과가 크게 달라지며, 유효 받음각을 벗어나면 오히려 항력이 증가함을 확인하였다. 따라서 유동방향에 관계없이 실린더의 항력을 감소시킬 수 있는 유동제어 기법을 고안하는 것이 필요할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 한국연구재단의 기초연구사업(NRF-2019R1F1A1064066)과 민군기술협력사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### REFERENCE

- 1) Zhang, S. and Zhong, S., 2010, "Experimental investigation of flow separation control using and array of synthetic jets," American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 48(3), pp.611~623.
- 2) Ayyappan, T. and Vengadesan, S., 2008, "Influence of staggering angle of a rotating rod on flow past a circular cylinder," Journal of Fluids Engineering, Vol. 130(3), 031103.
- 3) Weier, T., Gerbeth, G., Mutschke, G., Lielausis, O., and Lammers, G., 2003, "Control of flow separation using electromagnetic forces," Flow, Turbulence and Combustion, Vol. 71, pp.5~17.
- 4) Park, H., Bernitsas, M.M., and Ajith, K.R., 2012, "Selective roughness in the boundary layer to suppress flow-induced motions of circular cylinder at  $30,000 < Re < 120,000$ ," Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 134(4), 014801.
- 5) Ünal, U.O. and Gören, Ö., 2011, "Effect of vortex generators on the flow around a circular cylinder: computational investigation with two-equation turbulence models," Engineering Applications

- of Computational Fluid Mechanics, Vol. 5(1), pp.99~116.
- 6) Hwang, J.Y., Yang, K.S., and Sun, S.H., 2003, "Reduction of flow-induced forces on a circular cylinder using a detached splitter plate," *Physics of Fluids*, Vol. 15(8), 2433.
  - 7) Bao, Z., Qin, G., He, W., and Wang, Y., 2018, "Numerical investigation of flow around a slotted circular cylinder at low Reynolds number," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 183, pp.273~282.
  - 8) Igarashi, T., 1978, "Flow characteristics around a circular cylinder with a slit: 1<sup>st</sup> report, flow control and flow patterns," *The Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 21(154), pp.656~664.
  - 9) Dong, S., Triantafyllou, G.S., and Karniadakis, G.E., 2008, "Elimination of vortex streets in bluff-body flows," *Physical Review Letters*, Vol. 100(2), 204501.
  - 10) Chen, W., Wang, X., Xu, F., Li, H., and Hu, H., 2017, "Passive jet flow control method for suppressing unsteady vortex shedding from a circular cylinder," *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 30(1), 04016063.
  - 11) Gao, D.L., Chen, W.L., Li, H., and Hu, H., 2017, "Flow around a circular cylinder with slit," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 82, pp.287~301.
  - 12) Kim, J. and Kim, J., 2018, "Flow around a circular cylinder with axially or helically arranged holes," 71<sup>st</sup> Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Vol. 63(13).
  - 13) Allen, H.J. and Vincenti, W.G., 1944, "Wall interference in a two-dimensional-flow wind tunnel, with consideration effect of compressibility," *NACA Report*, Vol. 782, pp.155~183.
  - 14) Dalton, C., 1971, "Allen and Vincenti Blockage corrections in a wind tunnel," *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol. 9(9), pp.1864~1865.
  - 15) Szepessy, S., and Bearman, P.W., 1992, "Aspect ratio and end plate effects on vortex shedding from a circular cylinder," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 234, pp.191~217.
  - 16) Bearman, P.W. and Wadcock, A.J., 1973, "The interaction between a pair of circular cylinders normal to a stream," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 61(3), pp.499~511.
  - 17) Williamson, C.H.K., 1985, "Evolution of a single wake behind a pair of bluff bodies," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 159, pp.1~18.
  - 18) Zhou, Y., Zhang, H.J., and You, M.W., 2002, "The turbulent wake of two side-by-side circular cylinders," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 458, pp.303~332.
  - 19) Gao, D.L., Chen, W.L., Li, H., and Hu, Hui., 2017, "Flow around a slotted circular cylinder at various angles of attack," *Experiments in Fluids*, Vol. 58(10), 132.