

## 큰에디모의 모형을 이용한 높은 레이놀즈 수에서의 사각 기둥 후면의 와열 분석: 풍향과 풍속, 기둥 너비의 영향

한범순<sup>1)</sup> · 곽경환<sup>2)\*</sup> · 백종진<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>서울대학교 지구환경과학부, <sup>2)</sup>강원대학교 환경융합학부

(접수일: 2017년 8월 31일, 수정일: 2017년 11월 9일, 게재확정일: 2017년 12월 4일)

## Analysis on Vortex Streets Behind a Square Cylinder at High Reynolds Number Using a Large-Eddy Simulation Model: Effects of Wind Direction, Speed, and Cylinder Width

Beom-Soon Han<sup>1)</sup>, Kyung-Hwan Kwak<sup>2)\*</sup>, and Jong-Jin Baik<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

<sup>2)</sup>School of Natural Resources and Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon, Korea

(Manuscript received 31 August 2017; revised 9 November 2017; accepted 4 December 2017)

**Abstract** This study investigates turbulent flow around a square cylinder mounted on a flat surface at high Reynolds number using a large-eddy simulation (LES) model, particularly focusing on vortex streets behind the square cylinder. Total 9 simulation cases with different inflow wind directions, inflow wind speeds, and cylinder widths in the  $x$ - and  $y$ -directions are considered to examine the effects of inflow wind direction, speed, and cylinder widths on turbulent flow and vortex streets. In the control case, the inflow wind parallel to the  $x$ -direction has a maximum speed of  $5 \text{ m s}^{-1}$  and the width and height of the cylinder are 50 m and 200 m, respectively. In all cases, down-drafts in front of the cylinder and updrafts, wakes, and vortex streets behind the cylinder appear. Low-speed flow below the cylinder height and high-speed flow above it are mixed behind the cylinder, resulting in strong negative vertical turbulent momentum flux at the boundary. Accordingly, the magnitude of the vertical turbulent momentum flux is the largest near the cylinder top. In the case of an inflow wind direction of  $45^\circ$ , the height of the boundary is lower than in other cases. As the inflow wind speed increases, the magnitude of the peak in the vertical profile of mean turbulent momentum flux increases due to the increase in speed difference between the low-speed and high-speed flows. As the cylinder width in the  $y$ -direction increases, the height of the boundary increases due to the enhanced updrafts near the top of the cylinder. In addition, the magnitude of the peak of the mean turbulent momentum flux increases because the low-speed flow region expands. Spectral analysis shows that the non-dimensional vortex generation frequency in the control case is 0.2 and that the cylinder width in the  $y$ -direction and the inflow wind direction affect the non-dimensional vortex generation frequency. The non-dimensional vortex generation frequency increases as the projected width of the cylinder normal to the inflow direction increases.

**Key words:** Vortex street, turbulent flow, square cylinder, wind speed and direction, cylinder width, large-eddy simulation

\*Corresponding Author: Kyung-Hwan Kwak, School of Natural Resources and Environmental Science, Kangwon National University, 1 Kangwondaehak-gil, Chuncheon 24341, Korea.  
Phone: +82-33-250-8575, Fax: +82-33-241-6640  
E-mail: khkwak@kangwon.ac.kr

## 1. 서 론

후류(wake), 소용돌이 등의 형태를 띠는 기둥 주변의 흐름은 풍동 실험이나 수치 실험을 통한 많은 연구에서 주요하게 다루어지고 있다(e.g., Breuer, 1998; Wang and Zhou, 2009). 특히, 기둥 후면에서 소용돌이가 줄지어 나타나는 와열(vortex street)은 유체역학적인 관점에서 많은 관심을 받아왔다. Wang and Zhou (2009)의 풍동 실험에 의하면 기둥의 양 옆면과 꼭대기면을 따라 아치 형태의 소용돌이가 생성된다. 주기적으로 생성되는 아치 형태의 소용돌이는 기둥 후면에서 와열을 형성한다. Wang et al. (2004)에 따르면 기둥 후면에서는 이 밖에도 기둥 꼭대기면 모서리의 끝 소용돌이(tip vortex)와 지표 근처의 기저 소용돌이(base vortex)를 볼 수 있다. 기둥 너비에 비해 기둥 높이가 낮으면 기둥 후면의 와열이 뚜렷하게 나타나지 않는 대신, 끝 소용돌이와 기저 소용돌이가 기둥 후면에서 주요해진다(Sumner et al., 2004).

와열의 생성 유무와 와열을 형성하는 소용돌이의 생성 주기는 레이놀즈 수(Reynolds number)에 크게 의존하는 것으로 알려져 있다. Lienhard (1966)와 Norberg (2003)는 소용돌이 생성 진동수  $f$ 를 유입 흐름에 수직한 기둥의 너비  $d$ 와 유속  $U$ 를 이용해 무차원화하여 레이놀즈 수에 따른 소용돌이 생성 진동수의 변화를 연구하였다. 와열은 일정 레이놀즈 수( $\sim 40$ ) 이상에서 형성되며, 와열이 나타난 이후에는 레이놀즈 수가 증가할수록 와열의 무차원화된 소용돌이 생성 진동수  $fd/U$ 가 대체로 증가한다. 무차원화된 소용돌이 생성 진동수는 300 이상의 레이놀즈 수에 대해 큰 변화없이 약 0.1~0.2를 유지하며, 높은 레이놀즈 수( $\sim 10^5$ - $10^7$ )에서는 증감을 반복한다. 이보다 더 높은 레이놀즈 수 범위에서는 다시 레이놀즈 수에 따라 증가한다.

기둥의 너비와 풍향 또한 무차원화된 소용돌이 생성 진동수에 영향을 미친다. Islam et al. (2012)에 의하면 기둥 너비에 따라 무차원화된 소용돌이 생성 진동수는 0.1~0.2 범위 내에서 변동을 보였으며, 대체로 유입 흐름에 수직한 기둥의 너비가 유입 흐름에 평행한 기둥의 너비보다 더 클 때 무차원화된 소용돌이 생성 진동수가 컸다. 대체적으로 기둥 면에 수직한 방향으로 바람이 불 때 무차원화된 소용돌이 생성 진동수가 작았다(Sohankar et al., 1997). 이 때에도 무차원화된 소용돌이 생성 진동수는 0.1~0.2의 범위에서 변화하였다. 하지만 이러한 결과는 낮은 레이놀즈 수에 대한 연구 결과로, 실제 건물 크기와 같은 높은 레이놀즈 수를 고려한 분석은 제한적이다.

최근에는 복잡한 흐름을 비교적 정확히 모의할 수 있는 큰에디모의(Large-Eddy Simulation, LES) 모형을

사용하여 기둥 주변 흐름과 와열을 연구하고 있다(e.g., Palau-Salvador et al., 2010; Krajnović, 2011; Uffinger et al., 2013). Palau-Salvador et al. (2010)은 기둥 꼭대기면 모서리 부근의 끝 소용돌이와 와열 간의 상호작용을 연구하였다. 수치 실험에서 끝 소용돌이는 와열을 이루는 소용돌이의 주기적인 생성을 방해하였으며, 이러한 상호작용은 기둥 너비에 비해 기둥 높이가 낮을수록 더욱 뚜렷해졌다. Krajnović (2011)은 기둥 후면 상층부에 하강하는 흐름이 나타나고, 결과적으로 아치 형태 소용돌이의 상층부가 풍상측으로 기울어짐을 밝혔다.

본 연구에서 고려한 이상적인 기둥은 실제 도시 지역의 고층 건물을 단순화한 기둥 모형이다. Han et al. (2017)의 LES 연구에 따르면, 후류, 와열, 건물 전면과 후면의 하강 기류와 상승 기류 등 이상적인 기둥 주변의 흐름이 실제 높은 건물 주변에서도 유사하게 나타난다. 따라서 높은 레이놀즈 수( $> 10^7$ )를 고려한 이상적인 기둥 주변 흐름 연구는 실제 고층 건물 주변의 흐름을 이해하는 데 기초가 된다. 하지만 이전 연구에서 기둥 주변 흐름과 와열의 수치 모의는 전산 자원의 한계로 인해 주로 상대적으로 낮은 레이놀즈 수에서 이루어졌다. 본 연구에서는 LES 모형을 이용하여 높은 레이놀즈 수에서 실제 건물 크기와 유사한 이상적인 기둥의 주변 흐름과 와열을 연구하였다. 그리고 주요 요인인 풍향과 풍속, 기둥 너비가 기둥 주변 흐름과 와열의 생성 주기에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 수치 모형과 실험 설계

본 연구에 사용된 LES 모형은 독일 하노버 대학교에서 개발한 PALM (PARallelized Large-eddy simulation Model) 3.10 버전이다(Maronga et al., 2015). PALM은 지배방정식으로 부시네스크 근사를 사용한 여과된(filtered) 나비에-스톡스(Navier-Stokes) 방정식을 사용한다. 아격자 규모의 난류 운동에너지 방정식을 풀어 아격자 규모의 운동량과 열 플럭스, 에디 점성을 계산한다(Deardorff, 1980). 유한 차분법과 엇갈림 격자계(staggered grid system)를 이용하며, 이류항의 계산에는 5차 풍상차분법(Wicker and Skamarock, 2002)을, 시간 적분에는 3차 룽게-쿠타(Runge-Kutta) 방법을 사용한다.

LES 모형을 이용하여 풍향과 풍속, 기둥의 너비가 건물 주변 흐름과 와열에 미치는 영향을 연구하기 위해 평평한 면 위의 사각 기둥을 고려한다. 모든 방향의 격자 간격은 5 m이며, 계산 영역의 크기는 2400 m ( $x$ )  $\times$  1200 m ( $y$ )  $\times$  720 m ( $z$ )이다. 격자 간격과 계산 영역의 크기를 달리한 별도의 실험에서 평균 흐름장 및

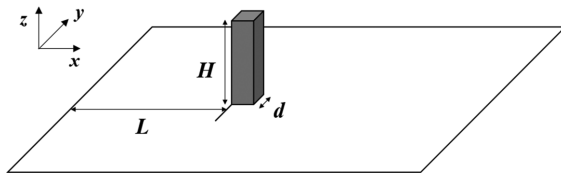


Fig. 1. Computational domain of the model.

기둥 후면의 와열 양상이 거의 유사하였으므로, 제시된 격자 간격과 계산 영역의 크기는 적절하다고 판단된다. 기준 실험은 기둥의 높이( $H$ )와 너비( $d$ )는 각각 200 m와 50 m인 정사각 기둥을 고려하며(Fig. 1), 유입 경계의 풍향은 양의  $x$  방향이다. 풍속은 지표에서  $0 \text{ m s}^{-1}$ 이고, 고도가 증가함에 따라 풍속이 증가하여 약 400 m에서 최대 풍속  $U (= 5 \text{ m s}^{-1})$ 에 도달한 후 이보다 높은 곳에서는 최대 풍속으로 일정하다. 최대 풍속  $U$ 와 기둥 너비  $d$ 에 대한 레이놀즈 수는 약  $1.6 \times 10^7$ 이다. 기준 실험은 Han et al. (2017)의 보충 자료에서 수행된 실험과 동일하다. 기준 실험을 기준으로 기둥을  $22.5^\circ$ 와  $45^\circ$  회전시킨 실험, 유입 경계의 최대 풍속을  $2.5 \text{ m s}^{-1}$ 와  $7.5 \text{ m s}^{-1}$ 로 변화시킨 실험, 기둥의  $x$  방향 너비와  $y$  방향 너비가 100 m와 150 m로 늘어난 실험을 추가로 수행하였다. 최대 풍속이  $2.5 \text{ m s}^{-1}$ 와  $7.5 \text{ m s}^{-1}$ 인 실험에서 최대 풍속에 도달하는 고도는 각각 약 300 m와 450 m다. 이와 같은 총 9가지의 수치 실험에서 기둥의 높이와 유입 경계에서 기둥까지의 거리( $L$ )는 각각 200 m와 약 900 m이고, 기둥의 중심과  $y$  방향 경계까지의 거리는 600 m로 일정하다. 기둥의  $x$  방향 너비를 증가시킨 실험을 제외한 모든 실험에서 기둥 중심으로부터 유입 경계까지 거리는 925 m다. 기둥의  $x$  방향 너비를 100 m와 150 m로 증가시킨 실험에서는 기둥 중심에서 유입 경계까지의 거리가 각각 950 m와 975 m다.  $y$  방향 경계에서는 주기 경계조건을, 유입 경계에서는 디리클레(Dirichlet) 경계조건을, 유출 경계에서는 방사 경계조건을 사용한다. 준정상상태의 흐름 모의 결과를 얻고자 총 2시간 동안 적분한 결과 중에서 마지막 30분의 결과를 분석하여 제시하였다.

### 3. 결과 및 논의

마지막 30분 결과를 평균한 속도장을 이용하여 사각 기둥 주변의 평균 흐름을 분석하였다. 기준 실험에서  $z = 150 \text{ m}$ 인  $x$ - $y$  평면의 평균 속도 벡터와  $x$  방향 풍속을,  $y = 600 \text{ m}$ 인  $x$ - $z$  평면의 평균 속도 벡터와  $z$  방향 풍속을 Fig. 2에 나타내었다. 사각 기둥 후면에는 후류가 발생하며, 후류 영역은 상대적으로 풍속이 약해 후류 경계에서 강한 시어층(shear layer)이 나

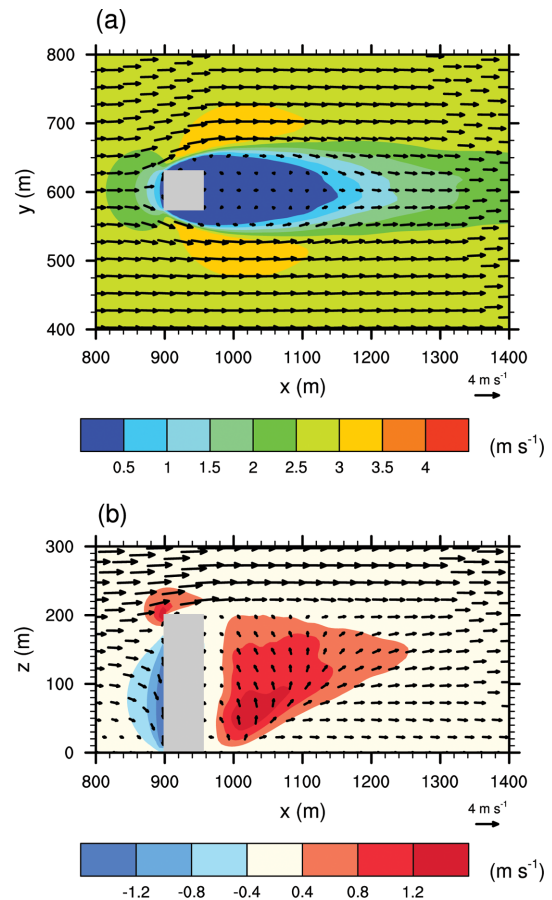
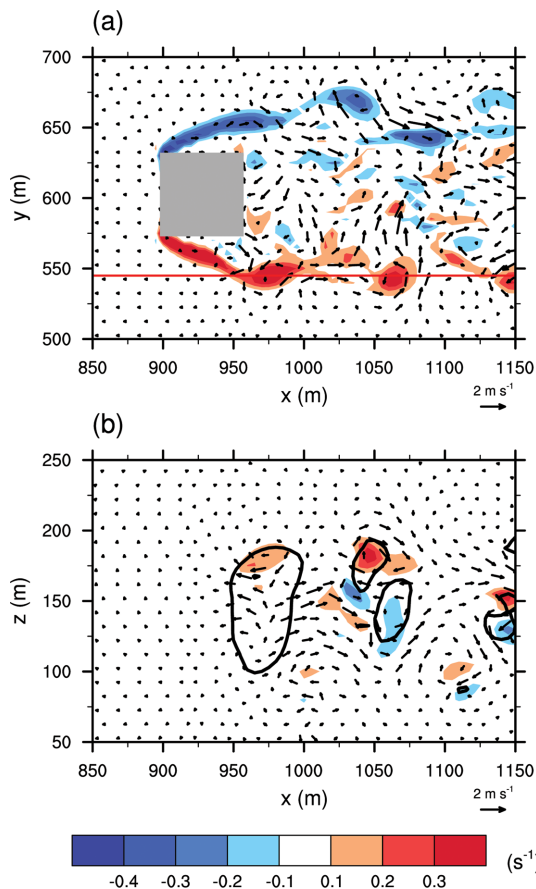


Fig. 2. (a) Fields of mean horizontal velocity vector and velocity in the  $x$ -direction on the  $x$ - $y$  plane at  $z = 150 \text{ m}$ . (b) Fields of mean velocity vector and vertical velocity on the  $x$ - $z$  plane at  $y = 600 \text{ m}$ .

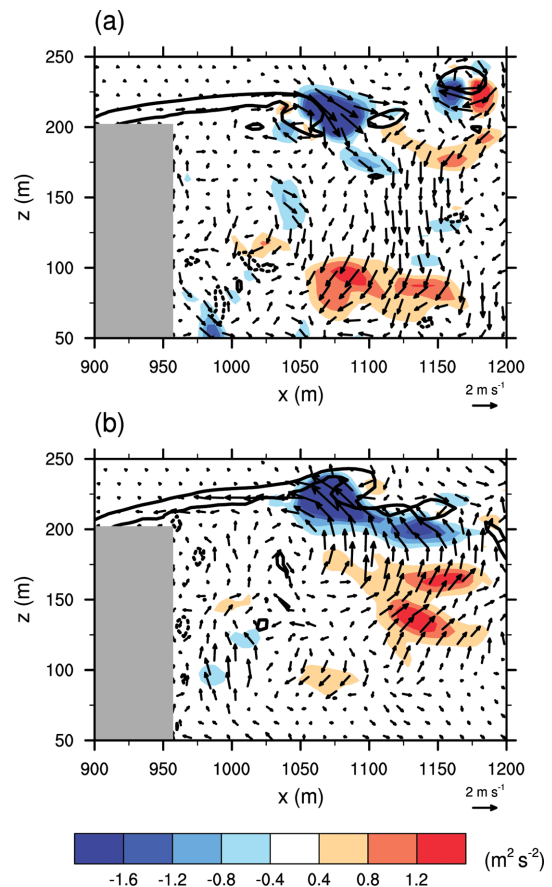
타난다(Fig. 2a). 사각 기둥 전면에서 하강 기류가, 후면에서 상승 기류가, 기둥 높이( $z = 200 \text{ m}$ ) 근처에서 강한 시어층이 나타난다(Fig. 2b). 이러한 흐름은 사각 기둥 주변에서 전형적으로 나타나는 흐름으로, 낮은 레이놀즈 수를 고려한 다른 연구에서도 보고된 바 있다(e.g., Sattari et al., 2012; Sumner, 2013). 풍속이 강해질수록 기둥 전면의 하강 기류와 후면의 상승 기류는 모두 강해진다. 반면 기둥의  $x$  방향 너비가 커질수록 기둥 후면의 상승 기류는 약해지며 기둥 전면의 하강 기류는 뚜렷한 변화가 없다. 기둥의  $y$  방향 너비가 커질수록 기둥 전면의 하강 기류는 강해지는 반면, 기둥 후면의 상승 기류는 약해진다. 기둥이  $45^\circ$  회전한 실험의 상승 기류와 하강 기류는 기준 실험과 대체로 비슷하지만, 기둥이  $22.5^\circ$  회전한 실험의 상승 기류와 하강 기류는 기둥의 중심축에 대해 비대칭적



**Fig. 3.** Fields of instantaneous velocity perturbation vector and vorticities in the  $z$ - and  $y$ -directions (a) on the  $x$ - $y$  plane at  $z=150$  m and (b) on the  $x$ - $z$  plane at  $y=545$  m at  $t=6710$  s, respectively. The red line in (a) indicates the cross section line for (b). Solid black contour lines in (b) represent the contours of vorticity in the  $z$ -direction with value  $0.2 \text{ s}^{-1}$ .

으로 변형된다.

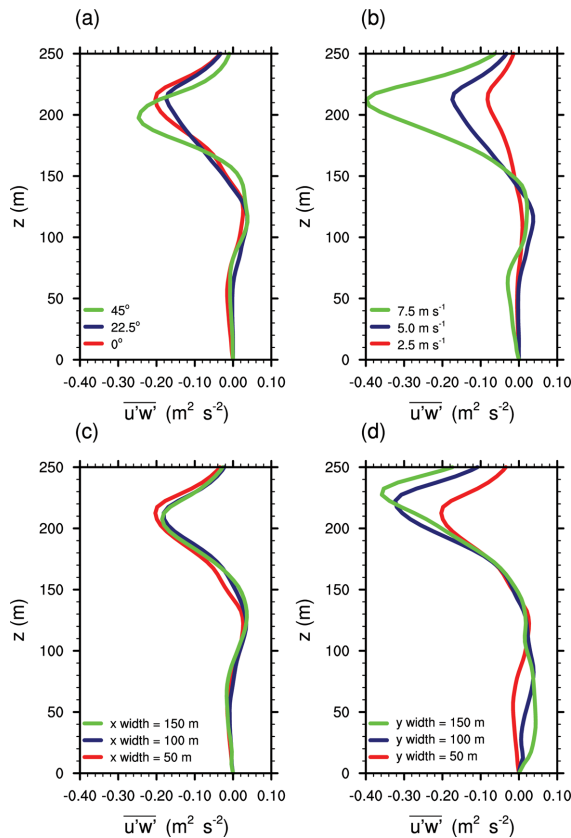
와열을 시각화하기 위해  $t=6710$  s에서  $z=150$  m인  $x$ - $y$  평면과  $y=545$  m인  $x$ - $z$  평면의 와도와 편차 속도 벡터를 Fig. 3에 나타내었다.  $x$ - $y$  평면에서는  $z$  방향 와도를,  $x$ - $z$  평면에서는  $y$  방향 와도를 보여준다. Figure 3a의 붉은 선은 Fig. 3b의 위치를, Fig. 3b의 검은 실선은  $z$  방향 와도 등치선( $=0.2 \text{ s}^{-1}$ )을 의미한다. 편차 속도는 순간 속도에서 시간 평균한 속도를 뺀 차이로 정의한다. 반시계 방향으로 시계 방향으로 회전하는 소용돌이가 위치한 곳에는 각각 양의 와도와 음의 와도가 나타난다. Figure 3a에서 반시계 또는 시계 방향으로 회전하는 소용돌이가 기둥 후면에 줄지어 나타나면서 와열을 형성한다. 또한 Fig. 3a에 나타난 소용돌이의  $x$ - $z$  단면에서는 기둥 높이 근처에서 시계 방향



**Fig. 4.** Fields of velocity perturbation vector and  $u'w'$  on the  $x$ - $z$  plane at (a)  $y=600$  m at  $t=6760$  s and (b)  $y=600$  m at  $t=6320$  s. Black solid and dashed contour lines represent the contours of vorticity in the  $y$ -direction with values  $0.2$  and  $-0.2 \text{ s}^{-1}$ , respectively.

으로 회전하는 소용돌이가 나타나는 경향을 보인다 (Fig. 3b). 이러한 와열과 기둥 높이 근처의 소용돌이는 모든 추가 실험에서 나타나며, 사각 기둥 후면의 후류 경계와 기둥 높이 근처에서 생성되는 시어층과 연관되어 있다. 또한 와열과 기둥 높이 근처의 소용돌이는 기둥 후면 후류 지역의 공기와 후류 바깥 지역의 공기를 섞는 역할을 한다.

기둥 후면의 난류 특성을 알아보기 위해 기준 실험의 결과에서  $x$ - $z$  평면의 편차 속도 벡터와  $u'w'$ 을 분석하였다(Fig. 4).  $u$ 와  $w$ 는 각각  $x$  방향 속도와  $z$  방향 속도를, 작은 따옴표는 시간 평균으로부터의 편차이다. Figure 4에서 검은 실선과 점선은  $y$  방향 와도 등치선(각각  $0.2$ 와  $-0.2 \text{ s}^{-1}$ )을 의미한다. Figure 4a에서 기둥 높이 근처의 소용돌이 전면에서 기둥 높이보다 상층에 위치한 상대적으로 속도가 빠른 흐름( $u'>0$ )이



**Fig. 5.** Vertical profiles of mean turbulent momentum flux in the cases of different (a) cylinder rotations, (b) inflow wind speeds, (c) cylinder widths in the  $x$ -direction, and (d) cylinder widths in the  $y$ -direction.

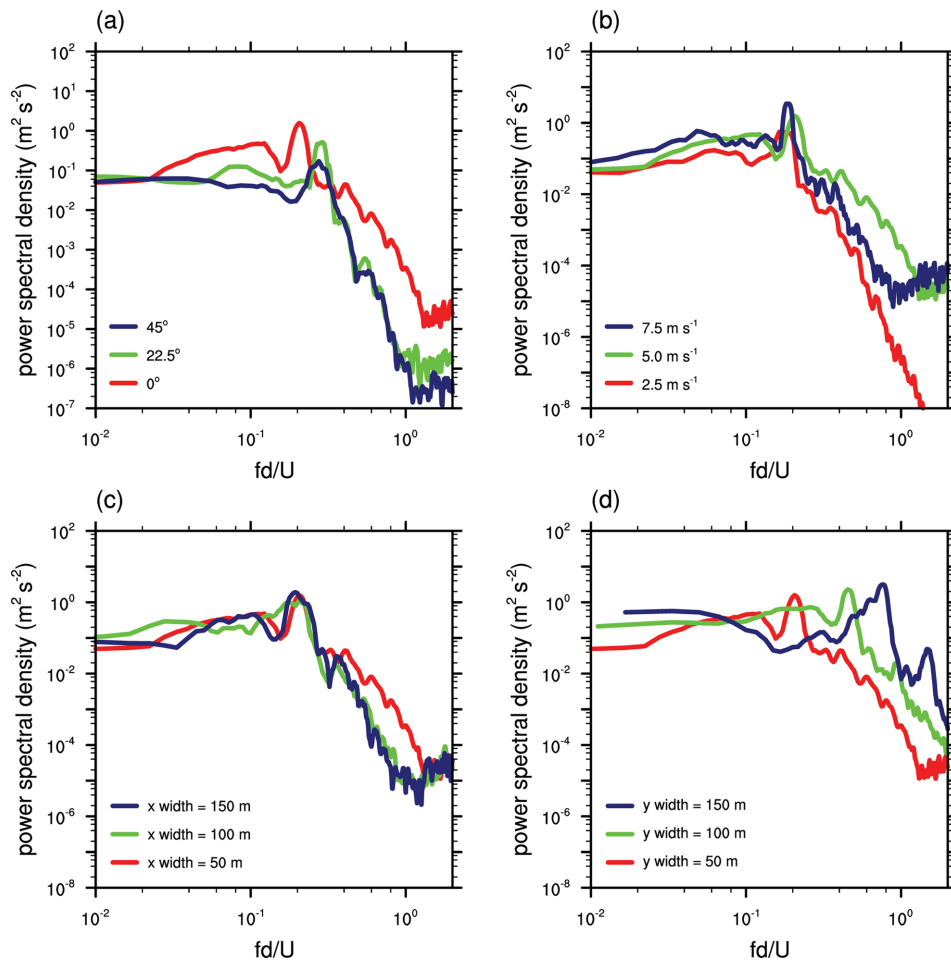
하강( $w' < 0$ )하며, Fig. 4b에서 기둥 높이보다 하층에 위치한 상대적으로 속도가 느린 흐름( $u' < 0$ )이 상승( $w' > 0$ )한다. 이는 기둥 후면에서 기둥 높이보다 낮은 곳에 위치한 속도가 느린 흐름과 기둥 높이보다 높은 곳에 위치한 속도가 빠른 흐름이 기둥 높이 근처의 시어층에서 난류에 의해 혼합되는 과정이다. 이때, 풍속, 풍향, 기둥의  $x$ ,  $y$  방향 너비는 시어층의 높이나 혼합되는 공기의 양을 변화시키는 요인으로 작용한다.

풍속, 풍향, 기둥의  $x$ ,  $y$  방향 너비가 기둥 후면의 혼합 과정에 미치는 영향을 조사하기 위해 각 실험에서 기둥 후면의 평균 연직 난류 운동량 플럭스의 연직 분포를 비교하였다(Fig. 5). 마지막 30분에 대해 시간 평균하였으며, 기둥 후면을 기준으로  $x$  방향으로 +25 m부터 +325 m까지,  $y$  = 517.5 m부터 682.5 m까지 영역에 대해 면적 평균하였다. 모든 조건의 실험에서 기둥 높이 근처의 음의 극대값이 뚜렷하다. 이는 앞선 Fig. 4에서 논의한 바와 같이 기둥 후면 시어층에

서 기둥 높이보다 높은 곳에 위치한 속도가 빠른 흐름과 기둥 높이보다 낮은 곳에 위치한 속도가 느린 흐름의 혼합이 주로 이루어지기 때문이다. 기둥이 22.5° 회전한 실험 결과는 기준 실험 결과와 큰 차이가 없지만, 기둥이 45° 회전한 실험 결과에서 상대적으로 극대값의 크기가 약간 크고 극대값의 발생 높이가 낮다(Fig. 5a). 이는 기둥 전면 꼭대기 근처의 상승 기류가 기준 실험에 비해 약하여 시어층 높이가 낮기 때문이다. 풍속이 강해질수록 기둥 후면의 느린 흐름과 빠른 흐름 간의 속도 차이가 커지기 때문에 극대값의 크기 또한 커진다(Fig. 5b).  $x$  방향 기둥의 너비가 다른 조건의 실험 결과에서 평균 연직 난류 운동량 플럭스의 연직 분포는 서로 유사한 반면(Fig. 5c),  $y$  방향 기둥의 너비의 증가는 경계면의 높이와 극대값의 크기를 모두 증가시킨다(Fig. 5d). 이는 기둥의  $y$  방향 너비 증가가 기둥 전면 꼭대기 근처의 상승 기류를 강화시켜 기둥 후면의 시어층 높이를 높임과 동시에 두 흐름의 혼합 영역을 넓히기 때문이다.

풍향, 풍속, 기둥의 너비가 와열의 생성 주기에 미치는 영향을 알기 위해 각 실험 결과의  $x$  방향 속도에 대해 스펙트럼 분석을 수행하였다. 풍향과 풍속이 서로 다른 조건의 실험에서는  $(x, y, z) = (1000 \text{ m}, 695 \text{ m}, 150 \text{ m})$  격자점의 값을 분석하였으며, 기둥의 너비가 기준 실험보다 증가한 실험에서는 위의 격자점에서 각각  $x$  방향으로 50, 100 m,  $y$  방향으로 25, 50 m 씩 이동한 격자점의 값을 분석하였다. 모든 격자점들은 소용돌이의 이동경로 상에 위치한다. Figure 6은 각 격자점의 무차원화된 진동수( $f/U$ )에 따른 에너지 스펙트럼 밀도를 보여준다. 기준 실험 결과에서 극대값이 나타나는 무차원화된 진동수는 0.2로, 이는 주기적인 소용돌이의 생성 때문이다. 낮은 레이놀즈 수를 고려한 이전 연구(e.g., Sumner et al., 2004; Bourgeois et al., 2011)에서도 비슷한 무차원화된 진동수가 보고되었으며, 기준 실험 조건에서의 무차원화된 진동수는 레이놀즈 수에 크게 영향을 받지 않음을 확인하였다. 풍향이 22.5°와 45°인 실험 결과에서 극대값이 나타나는 무차원화된 진동수는 기준 실험에 서보다 약간 더 큰 ~0.3이다(Fig. 6a). 이는 주로 유입 흐름에 수직한 기둥의 너비 증가가 원인으로, 실제 소용돌이 생성 주기는 모든 풍향에 대해 약 50 s로 크게 변하지 않는다. 풍속이 서로 다른 실험 결과에서 스펙트럼 밀도의 극대값이 나타나는 무차원화된 진동수는 모두 0.2 근처이며(Fig. 6b), 풍속과 실제 소용돌이 생성 진동수는 서로 정비례한다. 기둥의  $x$  방향 너비를 증가시킨 실험 결과에서도 무차원화된 진동수는 거의 일정하고, 실제 소용돌이 생성 주기도 크게 변하지 않는다(Fig. 6c). 단, 기둥의  $y$  방향 너비를 증가



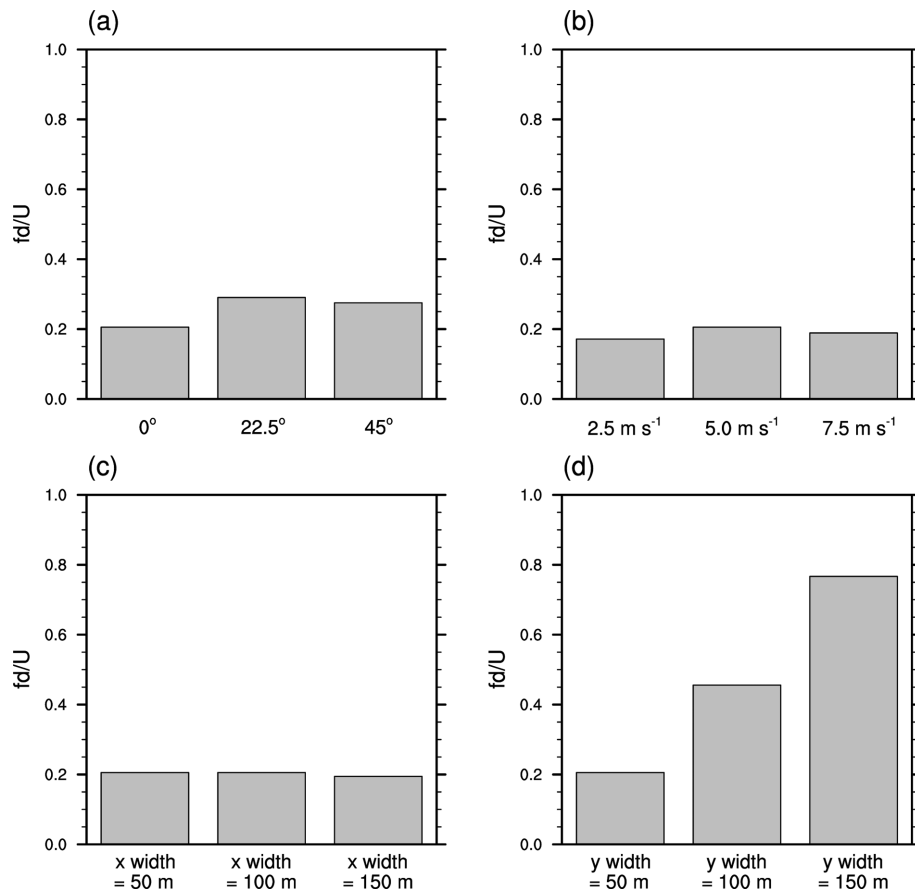


**Fig. 6.** Power spectral densities of velocity in the  $x$ -direction at  $z = 150$  m in the cases of different (a) cylinder rotations, (b) inflow wind speeds, (c) cylinder widths in the  $x$ -direction, and (d) cylinder widths in the  $y$ -direction. In the cases of different cylinder rotations and inflow wind speeds, the power spectral densities are calculated at points  $(x, y) = (1000 \text{ m}, 695 \text{ m})$ . In the cases of cylinder widths of 50, 100, and 150 m in the  $x$ -direction, the power spectral densities are calculated at points  $(x, y) = (1000 \text{ m}, 695 \text{ m})$ ,  $(1050 \text{ m}, 695 \text{ m})$ , and  $(1100 \text{ m}, 695 \text{ m})$ , respectively. In the cases of cylinder widths of 50, 100, and 150 m in the  $y$ -direction, the power spectral densities are calculated at points  $(x, y) = (1000 \text{ m}, 695 \text{ m})$ ,  $(1000 \text{ m}, 720 \text{ m})$ , and  $(1000 \text{ m}, 745 \text{ m})$ , respectively.

시킨 실험 결과에서 기둥 너비 증가에 따른 유의미한 진동수 증가가 확인된다(Fig. 6d). 이는 유입 흐름에 수직한 기둥의 너비가 증가하고 실제 소용돌이 생성 주기가 짧아지기 때문이다.

Figure 7은 각 실험 조건에서 스펙트럼 밀도의 극대값이 나타나는 무차원화된 진동수를 정리하여 보여 준다. 서로 다른 풍속과 기둥의  $x$  방향 너비 조건에 대해서는 무차원화된 진동수가 모두 약 0.2이다(Figs. 7b, c). 하지만 서로 다른 풍향 또는 기둥의  $y$  방향 너비 조건에 대해서는 스펙트럼의 극대값이 0.2 보다 큰 무차원화된 진동수에서 나타난다(Figs. 7a, d). 이는 주

로 유입 흐름에 수직한 기둥의 너비가 증가하기 때문으로 실제 소용돌이의 생성 진동수는 크게 변하지 않는다. 이는 낮은 레이놀즈 수에서의 이전 연구에서 풍향(Sohankar et al., 1997) 또는 유입 흐름에 수직한 기둥의 너비(Islam et al., 2012)에 따라 실제 소용돌이 생성 진동수도 함께 변한 것과는 다른 결과다. 결론적으로 높은 레이놀즈 수( $\sim 10^7$ )에서는 유입 흐름에 수직한 기둥의 너비가 실제 소용돌이 생성 진동수에 영향을 주지 않으며, 이에 따라 무차원화된 소용돌이 생성 진동수와 유입 흐름에 수직한 기둥의 너비는 양의 상관관계를 갖는다.



**Fig. 7.** Bar charts of the peak frequency in the cases of different (a) cylinder rotations, (b) inflow wind speeds, (c) cylinder widths in the x-direction, and (d) cylinder widths in the y-direction.

#### 4. 정리 및 결론

본 연구는 LES 모형을 이용해 높은 레이놀즈 수에서 사각 기둥 주변 흐름과 와열을 분석하고, 풍향과 풍속, 기둥의 너비가 기둥 주변의 흐름과 와열에 미치는 영향을 조사하였다. 평평한 지형 위의 사각 기둥을 고려한 이상적인 수치 실험을 수행하였으며, 기준 실험은 기둥의 너비 50 m, 높이 200 m인 정사각 기둥과 최대 풍속  $5 \text{ m s}^{-1}$ 를 고려하였다. 추가적으로 기준 실험에서 기둥을  $22.5^\circ$ ,  $45^\circ$  회전시킨 실험, 최대 풍속을  $2.5 \text{ m s}^{-1}$ ,  $7.5 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정한 실험, 기둥의 x, y 방향 너비를 100 m, 150 m로 증가시킨 실험을 수행하였다.

모든 실험에서 기둥 전면에는 하강 기류가, 후면에는 상승 기류와 후류가 발생하였다. 기둥 후면에서 와열의 형성과 기둥 높이 근처에서 시계방향으로 회전하는 소용돌이를 확인하였다. 또한 기둥 높이 아래에

위치한 느린 흐름과 기둥 높이 위에 위치한 빠른 흐름이 혼합되면서 큰 음의  $u'w'$ 을 보였다. 이에 따라 기둥 후면에서 면적 평균한  $u'w'$ 의 연직 분포는 항상 기둥 높이 근처에서 극대값을 나타내었다. 기둥을  $45^\circ$  회전시킨 실험에서 기둥 후면의 두 흐름 간 경계면이 낮아짐에 따라 상대적으로  $u'w'$ 의 극대값이 나타나는 높이도 낮아졌다. 풍속을 증가시킨 실험에서 기둥 후면의 두 흐름 간 속도 차가 커짐에 따라  $u'w'$ 의 극대값의 크기는 증가하였다. y 방향 기둥의 너비를 증가시킨 실험에서 기둥 후면의 두 흐름 간 경계면이 높아지고 또한 수평적으로도 넓어져 결과적으로 두 흐름이 혼합되는 영역이 증가하였다. 이로써 y 방향 기둥 너비의 증가는  $u'w'$ 의 극대값이 나타나는 높이와 극대값의 크기를 증가시키는 것으로 확인하였다. 각 실험 결과를 바탕으로 와열의 생성 주기를 알아보기 위해 x 방향 풍속에 대해 스펙트럼 분석을 수행하였다. 기준 실험에서는 이전 연구 결과와 같이 무차원

화된 진동수 0.2에서 스펙트럼 밀도의 극대값이 나타났다. 극대값이 나타나는 무차원화된 진동수는 풍속과 기둥의  $x$  방향 너비에 거의 의존하지 않았지만, 풍향이 변하거나 기둥의  $y$  방향 너비가 커지는 경우 증가하였다. 유입 흐름에 수직인 기둥의 너비가 증가함에 따라 스펙트럼 밀도의 극대값이 나타나는 무차원화된 진동수가 증가하는 것으로 확인하였다.

실제 도시 지역과 같이 높은 레이놀즈 수에서 기둥 주변의 흐름과 와열의 특성은 본 연구에서 조사한 풍향과 풍속, 기둥의  $x$ ,  $y$  방향 너비 이외에도 이웃한 기둥의 유무나 기둥 단면의 모양 등 다양한 요인에 의해 달라질 수 있다. 또한 본 연구에서 고려하지 않은 지표 가열과 대기 안정도도 흐름 특성에 주요한 영향을 줄 수 있는 요인이다. 향후에 이에 대한 추가적인 연구가 필요하며, 이러한 요인들이 기둥 주변 흐름에 미치는 영향을 종합적으로 분석함으로써 도시 지역의 오염물질 확산 과정을 이해하는 데 기여할 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구자지원사업(과제번호 2016R1A2B2013549) 및 기상청 국립기상과학원 주요사업 “차세대 도시농림 융합스마트 기상서비스 개발”의 지원을 받아 수행되었습니다.

### REFERENCES

- Bourgeois, J. A., P. Sattari, and R. J. Martinuzzi, 2011: Alternating half-loop shedding in the turbulent wake of a finite surface-mounted square cylinder with a thin boundary layer. *Phys. Fluids*, **23**, 095101, doi:10.1063/1.3623463.
- Breuer, M., 1998: Large eddy simulation of the subcritical flow past a circular cylinder: Numerical and modeling aspects. *Int. J. Numer. Meth. Fl.*, **28**, 1281-1302.
- Deardorff, J. W., 1980: Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. *Bound.-Layer Meteor.*, **18**, 495-527.
- Han, B.-S., S.-B. Park, J.-J. Baik, J. Park, and K.-H. Kwak, 2017: Large-eddy simulation of vortex streets and pollutant dispersion behind high-rise buildings. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **143**, 2714-2726, doi:10.1002/qj.3120.
- Islam, S. U., C. Y. Zhou, A. Shah, and P. Xie, 2012: Numerical simulation of flow past rectangular cylinders with different aspect ratios using the incompressible lattice Boltzmann method. *J. Mech. Sci. Tech.*, **26**, 1027-1041, doi:10.1007/s12206-012-0328-4.
- Krajnović, S., 2011: Flow around a tall finite cylinder explored by large eddy simulation. *J. Fluid Mech.*, **676**, 294-317, doi:10.1017/S0022112011000450.
- Lienhard, J. H., 1966: *Synopsis of Lift, Drag, and Vortex Frequency Data for Rigid Circular Cylinders*. Technical Extension Service, 32 pp.
- Maronga, B., and Coauthors, 2015: The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: Model formulation, recent developments, and future perspectives. *Geosci. Model Dev.*, **8**, 1539-1637, doi:10.5194/gmdd-8-1539-2015.
- Norberg, C., 2003: Fluctuating lift on a circular cylinder: Review and new measurements. *J. Fluids Struct.*, **17**, 57-96.
- Palau-Salvador, G., T. Stoesser, J. Fröhlich, M. Kappler, and W. Rodi, 2010: Large eddy simulations and experiments of flow around finite-height cylinders. *Flow Turbul. Combust.*, **84**, 239-275, doi:10.1007/s10494-009-9232-0.
- Sattari, P., J. A. Bourgeois, and R. J. Martinuzzi, 2012: On the vortex dynamics in the wake of a finite surface-mounted square cylinder. *Exp. Fluids*, **52**, 1149-1167, doi:10.1007/s00348-011-1244-6.
- Sohankar, A., C. Norberg, and L. Davidson, 1997: Numerical simulation of unsteady low-Reynolds number flow around rectangular cylinders at incidence. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, **69**, 189-201.
- Sumner, D., J. L. Heseltine, and O. J. P. Dansereau, 2004: Wake structure of a finite circular cylinder of small aspect ratio. *Exp. Fluids*, **37**, 720-730.
- \_\_\_\_\_, 2013: Flow above the free end of a surface-mounted finite-height circular cylinder: A review. *J. Fluid Struct.*, **43**, 41-63, doi:10.1016/j.jfluidstructs.2013.08.007.
- Uffinger, T., I. Ali, and S. Becker, 2013: Experimental and numerical investigations of the flow around three different wall-mounted cylinder geometries of finite length. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, **119**, 13-27, doi:10.1016/j.jweia.2013.05.006.
- Wang, H. F., Y. Zhou, C. K. Chan, W. O. Wong, and K. S. Lam, 2004: Flow structure around a finite-length square prism. *Proc. of the 15th Australasian Fluid Mechanics Conference*, Sydney, Australia. [Available online at [https://www.researchgate.net/profile/Ck\\_Chan2/publica-](https://www.researchgate.net/profile/Ck_Chan2/publica-)



- tion/237307611\_Flow\_Structure\_Around\_A\_Finite-Length\_Square\_Prism/links/551958470cf2d241f3563737.pdf.]
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2009: The finite-length square cylinder near wake. *J. Fluid Mech.*, **638**, 453-490.
- Wicker, L. J., and W. C. Skamarock, 2002: Time-splitting methods for elastic models using forward time schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2088-2097.