

# 차량 유도풍 풍력발전 활용 가능성의 전산유동해석

김현구\*\*\*, 이상우, 장문석, 신형기

## Computational Flow Analysis on Applicability of Vehicle-Induced Wind to Highway to Wind Power Generation

Hyun-Goo Kim\*\*\*, Sang-Woo Woo, Moon-Seok Jang and Hyung-Ki Shin

### Abstract

The possibility of whether the induced wind from a vehicle traveling on highway can be used in wind power generation has been verified through computational flow analysis. The bus which is presumed to accompany relatively strong and wide range of induced wind compared to passenger vehicles because of its wide frontal area has been set as the subject of research. In order to ensure the reliability of research, the flow analysis surrounding the bus on a flat road where median strip is not installed has been compared with a preceding research while the validity of grid system and interpretation method used in this research have been assured by a qualitative method. In case of the median strip type wind power generator system, because it has been verified that a strong streamwise wind speed (5 m/s) is derived from the contraction effect of flow passage between the bus and the median strip while maintaining a relatively consistent upwind wind speed (1.4 m/s) in vertical direction in the wake area after the bus passes by although the change of wind speed is intense, it was decided as having some possibility of wind power generation. In case of the traffic sign panel type wind power generator system installed at the upper top of highway, because the wind speed of 2 m/s level has been derived for a limited time only at a section equal to the length of the bus and a faint induced wind speed less than 0.5 m/s was shown at other regions, it was decided as having almost no possibility of wind power generation.

### Key words

Median Strip(중앙분리대), Highway(고속도로), Wind Power Generation(풍력발전), Computational Flow Analysis(CFA, 전산 유동해석)

(접수일 2008. 11. 17, 수정일 2008. 11. 19, 게재확정일 2008. 11. 20)

\*\*\* 한국에너지기술연구원 풍력발전연구단

■ E-mail : hyungoo@kier.re.kr ■ Tel : (042)860-3376 ■ Fax : (042)860-3543

## 1. 서론

최근 도심 및 고속도로에서 주행하는 차량에 의해 발생되는 바람, 즉 차량 유도풍을 이용하여 풍력발전의 활용범위를

확대하고자 하는 아이디어가 다수 제시되고 있다. 실례로 Mark Overholzer<sup>(1)</sup>는 Fig. 1과 같이 도심도로나 고속도로 중앙분리대에 수직축 풍력발전기를 매설하여 상·하행선 교행차량에 의한 유도풍으로 전력을 생산하는 방안을 제안하였

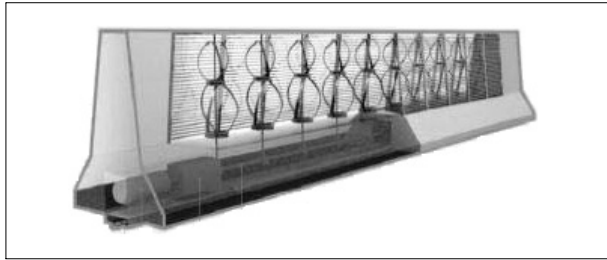


Fig. 1 Wind turbines embedded in a median strip.

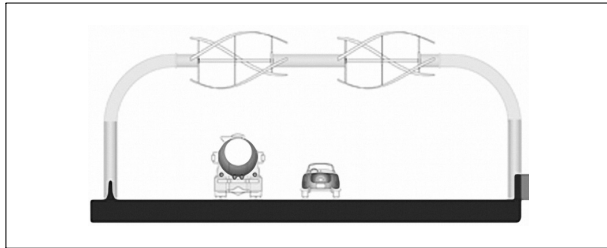


Fig. 2 Wind turbines installed above a highway.

다. 또 다른 예로는 Fig. 2와 같이 고속도로 상부에 교통표지판 형태로 풍력발전기를 설치하는 아이디어<sup>(2)</sup>가 제안되기도 하였다.

주행차량에 대한 선행연구를 살펴보면, 주행차량의 공기역학적 항력(drag)을 줄이기 위해 차량의 형상에 따른 유동장 해석에 관한 연구<sup>(3,4)</sup>가 대부분이며, 차량표면에서 발생하는 공력소음과 불순물 부착방지를 위한 인위적 유동박리(flow separation)에 대한 연구<sup>(4,5)</sup>, 주행차량의 양력(lift) 저감을 위한 스포일러(spoiler), 차량 바닥면 형상 등에 관한 연구<sup>(6-8)</sup>가 수행되었다.

이렇듯 주행하는 차량에 대한 대부분의 선행연구들은 차량 유도풍의 풍향·풍속 그리고 영향범위 보다는 차량의 형상설계 및 주행안정성 등에 초점을 맞춰져 있었기에 차량에 인접한 유동장만을 연구대상으로 하였다. 반면에 중앙분리대가 차량 유도풍에 미치는 영향이나 차량 주위의 넓은 범위에 대한 유도풍을 관심대상으로 한 선행연구를 찾아보기는 어려웠다.

본 연구에서는 풍력발전의 다양한 활용차원으로 제시된 「고속도로 중앙분리대형 풍력발전기(Fig. 1)」와 「교통표지판형 풍력발전기(Fig. 2)」 아이디어의 실현 가능성을 확인하기 위해 주행 중인 차량 유도풍의 풍향풍속 변동성과 영향범위를 파악하기 위하여 전산유동해석(CFA)을 수행하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 가정(Assumption)

주행 중인 차량에 의한 유도풍의 전산유동해석을 위해 다음과 같은 가정을 적용하였다.

- (1) 주행 차량은 버스(12m×2.5m×3m)이다.
- (2) 중앙분리대의 높이는 1.2m이다.
- (3) 고속도로는 완전 평지이고, 직선이다.
- (4) 고속도로의 1차선 1개 구간만 고려한다.
- (5) 버스 1대만 고려한다.
- (6) 중앙분리대와 버스간 이격거리는 1.2m이다.
- (7) 버스는 100km/h(27.8m/s)로 주행한다.
- (8) 자연풍의 풍속은 0m/s이다.
- (9) 타이어 등 부착물의 영향은 무시한다.

버스는 승용차에 비하여 전면적(frontal area)이 넓기 때문에 큰 항력을 받으며 추진하게 되며 따라서 차량 유도풍이 승용차에 비하여 강하고 영향면적도 넓을 것으로 판단된다. 또한 버스는 승용차보다 길고 측면 면적이 넓기 때문에 중앙분리대와 버스 사이는 협착유로가 형성됨에 따라 급격한 풍속 증가가 예측된다. 이에 본 연구에서는 초도 연구적 관점에서 차량주변에 가장 큰 유도풍을 일으킬 것으로 예측되는 버스를 연구대상으로 하였다. 실제 주행상황을 모사하기 위해서는 상·하행선 차량 및 전·후방에서 주행하는 차량에 대한 영향까지 고려해야 하지만, 본 연구에서는 1개 차선 버스 1대만을 고려하여 해석을 수행하였다.

국내 고속도로 중앙분리대의 일반적인 높이는 0.8~1.3m이지만 2001년 이후부터는 한국도로공사 지침에 따라 1.27m 높이로 신설되고 있어, 본 연구에서는 중앙분리대의 높이를 M=1.2m, 고속도로 중앙분리대와 버스의 간격은 중앙분리대와 차선의 여유폭을 고려하여 E=1.2m로 가정하였다.

### 2.2 모델링(Modeling)

점성 유동장의 지배방정식은 레이놀즈-평균 나비에-스톡스(RANS; Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식이며, 난류 유동장의 해석을 위해 RNG k-ε 난류모델을 사용하였다. 최근 들어 컴퓨터 성능의 발달로 수 천만 개에 이르는

격자를 사용할 수 있게 되었고, 와류진동(vortex shedding)과 같은 비정상적(unsteady) 특징을 나타내는 흐름과 외부유동에 대한 신뢰도가 높은 LES(Large Eddy Simulation)를 이용하여 해석한 사례<sup>(9,10)</sup>들이 많기는 하지만 LES는 대단한 계산용량과 저장용량을 요구하는 비정상 유동장 해석이므로 RANS에 의한 유동장 해석을 수행하였다. 표준  $k-\epsilon$  모델은 모델자체가 단순하고, 예측성능이 우수하여 복잡한 3차원 형상 등의 유동해석에도 광범위하게 적용되어 수용할 만한 결과를 얻고 있다. 하지만 국부적인 평형, 강한 압력구배, 유선의 곡률 효과, 회전류 등과 같은 유동에서는 정확한 예측을 기대하기 어렵다. 표준  $k-\epsilon$  모델의 예측성능을 향상시키기 위해 고안된 수정  $k-\epsilon$  모델 중 RNG  $k-\epsilon$  모델은 난류에너지 소산율 방정식의 이론적 유도과정을 통하여 표준  $k-\epsilon$  모델보다 월등한 결과를 보여 주고 있어 널리 사용되고 있다.<sup>(11)</sup> 이에 본 연구에서는 박리 유동장의 정확한 예측<sup>(7,11,12)</sup>을 기대하기 위해 RNG  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하였다.

상기 가정을 바탕으로 전산유동해석을 위한 경계조건과 버스의 형상은 Fig. 3에 도시하였다. 좌표의  $x=0$ 은 버스의 전면,  $z=0$ 은 지면,  $y=0$ 은 버스를 정면에서 봤을 때의 원점이다. 해석에 사용된 격자는 약 500만개이고, 버스 주변에는 사면체 격자(tetrahedral mesh)를 조밀하게 구성하였고 그 외 영역은 육면체 격자(hexahedral mesh)로 구성하였다.

일반적으로 주행 중인 차량 주위 유동장 해석시 사용하는 상대운동 좌표계를 적용하였는데, 즉 원방 접근풍속과 지면 그리고 중앙분리대는 버스의 주행방향과 반대방향(Fig. 3에서  $+x$ 방향)으로 움직이나 차량은 정지 상태로 변환하여 해석함으로써 지면과 버스의 상대풍속( $U_x-U_\infty$ )으로부터 풍속분

포를 구하였다.

해석영역의 좌우측과 윗면 경계조건은 대칭조건(symmetry)으로 설정하였고, 버스와 지면 그리고 중앙분리대의 거칠기는 고려하지 않았다. 접근풍속의 풍속분포는 균일하게(uniform)  $U_\infty=27.8\text{m/s}$ 로 설정하였고, 난류강도는 선행연구를 참고하여 0.3%로 설정하였다.<sup>(9)</sup> Fig. 3은 버스의 형상 및 해석영역 등의 정보를 보여주고 있는데, 버스의 높이( $H=3\text{m}$ )를 기준으로  $S/H=3$ ,  $F/H=6$ ,  $G/H=3$ ,  $I/H=20$  크기의 공간을 해석영역으로 지정하였으며 모델링된 버스형상은 일반적인 고속버스의 크기로  $L/H=4$ ,  $W/H=0.83$ ,  $R/H=0.067$ 이고 바퀴 및 버스 외부 부착물의 영향을 무시하였고 지면과 버스 하부면의 간격은  $T/H=0.167$ 로 설정하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 수치해석에 대한 검증

Jang et al.<sup>(11)</sup>은 뾰족한 물체(bluff body) 주위유동에 대한 RANS 수치모의 시 격자계 의존성이 상대적으로 계산오차에 민감한 영향을 미치기 때문에 이에 대한 사전검토가 반드시 필요하다고 밝히고 있다. 이에 본 연구에서는 중앙분리대를 제외한 일반적이 주행 차량에 대한 전산유동해석을 실시하되 선행연구의 사례를 참조하여 격자계 의존성을 확인함으로써 해석방법 및 결과의 신뢰성도를 향상시키는 과정을 거쳤다.

유동박리가 발생하는 위치와 재순환영역에 크기는 버스형

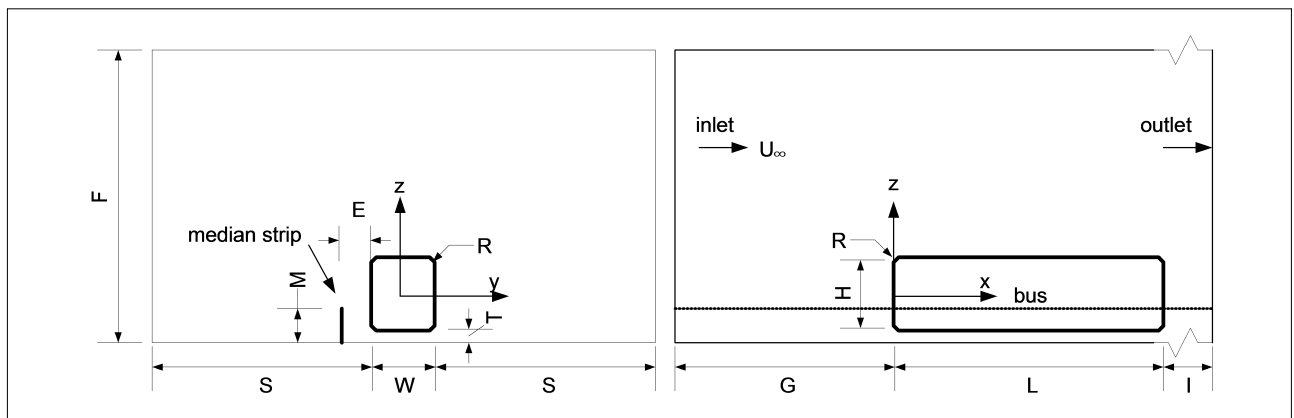


Fig. 3 Geometry of a bus and boundary conditions.

상 육면체 꼭지점 모따기의 곡률인 R의 크기와 레이놀즈 수 (Reynolds number)에 의해 결정되기 때문에 비교대상으로 삼기 어렵다. 그러므로 일반적인 뭉뚝한 물체주위 유동에 나타는 특성인 물체측면의 익단와류(trailing vortex)와 후류의 종방향 와류(longitudinal vortex)가 전산유동해석에서 정상적으로 생성되는지를 확인하였다. Figs. 4와 5는  $x=3H$ 와  $x=10H$ 의  $yz$ -평면에 대한 유선도(streamline plot)를 나타낸 그림으로, Fig. 4에서는 버스 상부 모서리를 기준으로 양측에 익단와류가, Fig. 5에서는 후류에서 전형적인 종방향 쌍둥이 와류(twin vortex)가 생성되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 정성적인 비교를 통하여 격자계 품질과 해석방법이 타당함을 확인하였다. 주행하는 버스에 대한 보다 상세한 전산유동해석 연구사례는 참고문헌<sup>(7,9,11)</sup>을 참조하기 바란다.

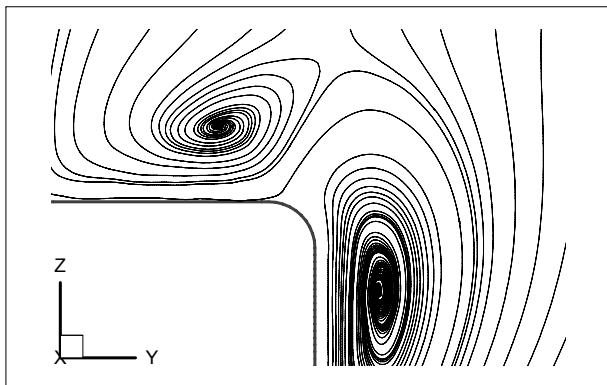


Fig. 4 Streamline plot on  $xz$ -plane at  $x=3H$ .

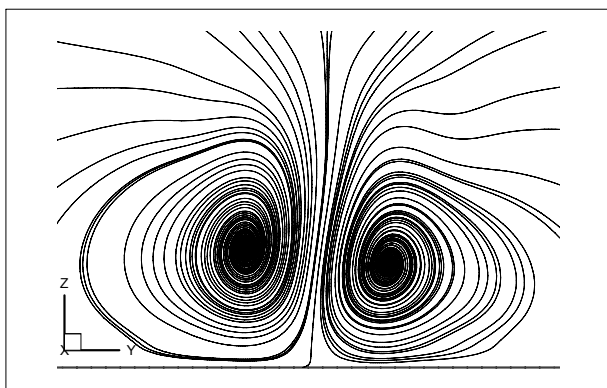
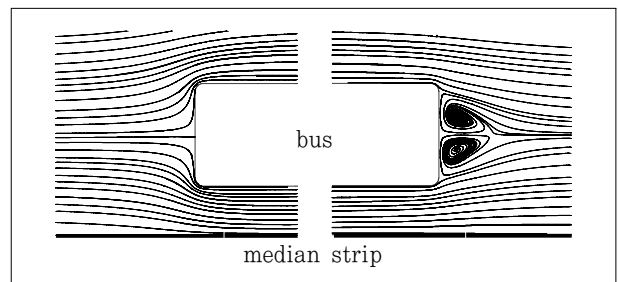


Fig. 5 Streamline plot on  $yz$ -plane at  $x=10H$ .

### 3.2 중앙분리대형 풍력발전기

Fig. 6은  $z=0.37H$ (지면으로부터 높이 1.1m)의  $yz$ -평면에서의 유선도를 도시한 것으로, 중앙분리대가 설치된 고속도로에서 버스가 주행함에 따라 버스와 중앙분리대 사이는 좁아지는 노즐과 같은 협착 유로를 형성하게 되어 강한 풍속이 유도되는 현상을 잘 설명하고 있다. 버스 후면에서는 모서리에서 박리가 발생하여 쌍둥이 형태의 박리기포(separation bubble)가 생성되는 것을 확인할 수 있다. 결국 이러한 박리 유동은 버스 후방으로 연결되어 공기를 회전시키며 버스에 끌려가는 종방향 쌍둥이 와류로 발전하는 것이다.

중앙분리대가 버스주위 유동장에 미치는 영향을 좀 더 자세 살펴보기 위해 Fig. 7에  $yz$ -단면의 유선도를 입체적으로 나타내었다. 버스 전면부에 부딪힌 공기가 중앙분리대로 흐르고, 버스 후면부에는 상대적으로 낮은 압력이 형성되기 때문에 중앙분리대에서 버스 방향으로 공기가 흐른다. 중앙분리대 부근에서의 큰 유동변화는 후류영역에서 확인할 수 있는데, 중앙분리대가 없이 주행할 때는 종방향 쌍둥이 와류가 생성되지만 중앙분리대 옆을 주행할 경우에는 Fig. 7의  $x=6H$   $yz$ -평면에서 볼 수 있듯이 한 개의 종방향 와류와 중앙분리대 모서리 부근에 동일 방향으로 회전하는 와류가 추가적으로 생성된다. 그 이유는 Fig. 5에서 고찰한 종방향 쌍둥이 와류는 버스의 좌·우측이 대칭이기 때문에 대칭성을 갖는 반면(참고로 Fig. 5는 와류진동 특성 상 다소 비대칭인 상태가 도시되었음), 중앙분리대의 존재하는 경우에는 버스의 좌·우 영역이 비대칭이 되고 중앙분리대와 버스 사이에서 상대적으로 강한 협착유로가 형성된다. 이에 의해 약한 와류가 강한 와류에 귀속되어 중앙분리대에 가까운 종방향 와류만이 탁월하게 나타나는 것으로 풀이된다. 결국 이러한 비대칭성



(a) frontal area

(b) rear area

Fig. 6 Streamline plot on plane  $z=0.37H$ .

이 Fig. 7의  $x=10H$   $yz$ -평면에서 볼 수 있듯이 종방향 와류를 빠르게 소멸시키는 것으로 판단된다.

Fig. 8은  $z=0.37H$ (지면으로부터 1.1m 높이),  $y=-0.78H$ (중앙분리대와 이격거리 0.1m) 위치에서  $x$ -방향으로의 각방향 유도풍 성분 즉,  $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$ 를 그래프로 표시한 것이다. 버스 전·후단 구간에서 급격한 풍향의 변화와 5m/s 정도의 강한 풍속이 유도되고 있다. 버스 전·후단에서의 급격한 풍향·풍속의 변화를 보다 잘 관찰하기 위해 Fig. 8 상단에 유도풍 벡터를 도시하였다. 참고로  $U_y$  성분이 비교적 작기 때문에  $xz$ -평면에서의 ( $U_x, U_z$ ) 벡터를 도시하였다. 버스 전단면

의 상류부에서는 버스의 돌진에 의해 버스 진행방향으로 밀려 올라가는 바람이 유도되지만 버스와 중앙분리대 사이구간에서는 협착된 유로에 의해 버스의 진행방향과 반대로 강한 측풍이 유도된다. 다시 버스 후단부를 지나며 버스 진행방향으로의 상승풍이 1.4m/s로 비교적 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다. Fig. 1과 같은 수직형 풍력발전기는 Fig. 8의 유도풍 성분 중  $U_x$  성분만에 의해 구동되므로 버스가 지나가는 순간 측풍 성분이  $-x$  방향에서  $+x$  방향으로 급격하게 바뀌며 강한 측풍의 지속시간도 버스가 지나가는 순간(0.43s)에 불과할 것이다.

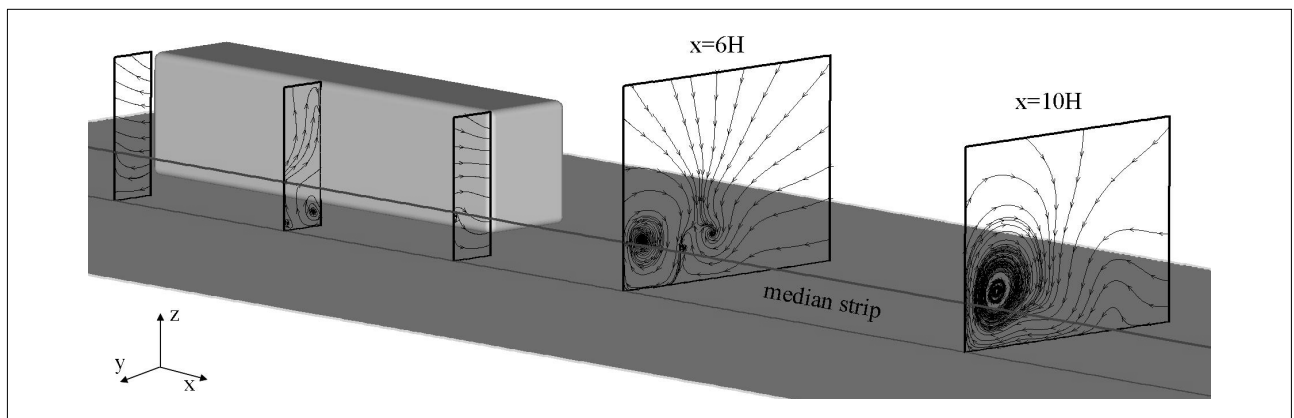


Fig. 7 Streamline plots on several  $yz$ -plans between median strip and a bus.

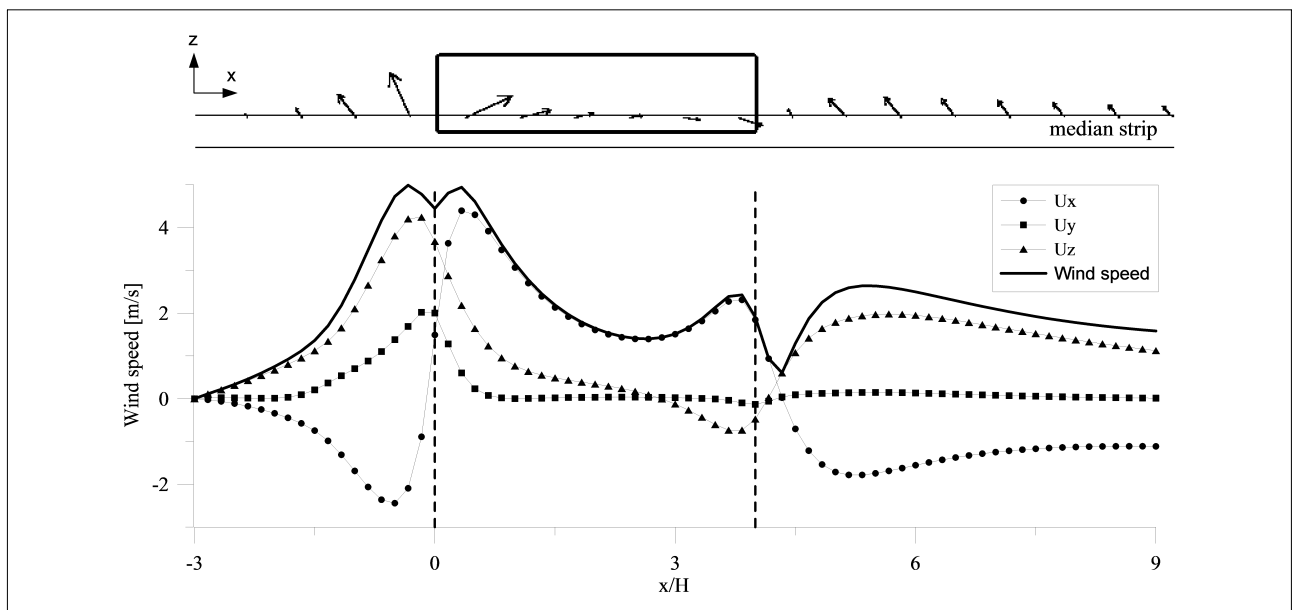


Fig. 8  $x$ ,  $y$ ,  $z$ -component of induced wind vector.

### 3.2 교통표지판형 풍력발전기

Fig. 9는  $y=0$   $xz$ -평면에서의 유도풍 상대속도에 의한 유선도로, 버스 전면 상부 모서리(edge)에서 유도박리가 발생하여 버스 상부에 박리기포(separation bubble)가 발달함을 확인할 수 있다. 또한 버스의 후방에는 버스의 진행방향(-x 방향)과 동방향의 공기흐름이 유도됨을 볼 수 있다. 참고로 Fig. 9에 점선으로 표시된 수직선 #A, #B, #C, #D, #E는 각각  $x=-2H, 0, 2H, 4H, 6H$  위치에 해당한다.

도로교통법 제 54조 및 동법 시행령 제 28조 3항에 따르면 터널 및 주행의 안전을 위해 주행차량의 높이를 4.2m로 제한하고 있다. 즉, Fig. 2에서의 풍력발전기 밑단의 최소 높이는 대략 5m 이상이 되어야 할 것이다. Fig. 10은 Fig. 9에 표시된 수직선의 각 위치에서 연직방향으로 높이 4~9m 구간의 풍속 분포도를 도시한 것이다. 버스의 상류부인 #A에서부터 버스의 전진에 의한 약한 풍속이 유도되어 버스의 전단부인 #B에서 가장 강한 유도풍이 발생하며 #C는 버스 상부의 박리기포의 재순환 특성이 연직 풍속분포에도 나타나고 있다(풍속 절대값으로 표현되었음). 버스의 후단부에서는 유도풍이 약간 강화되었다가 하류로 가면서 급격히 소멸되는 변화특성

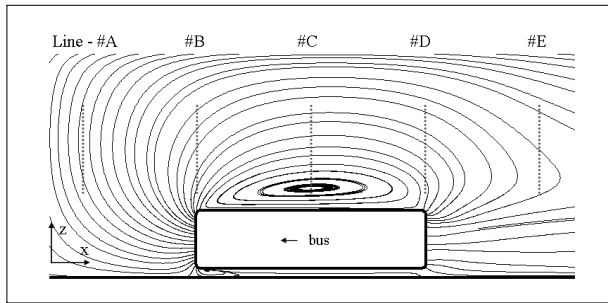


Fig. 9 Streamline plot on plane  $y=0$ .

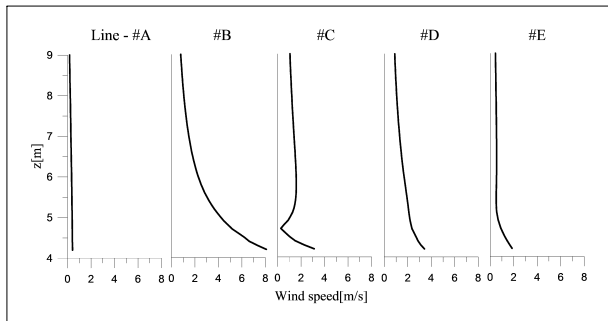


Fig. 10 Comparison of vertical wind speed profiles.

을 보이는데, 실제로 풍력발전기가 설치될 수 있는 높이를 5.5~6.5m 구간으로 보면 버스의 통과 순간에만 2m/s 정도의 유도풍이 발생한다. 또한 버스보다 전면적도 작고 높이도 낮은 승용차는 그 이하 수준의 유도풍속일 것으로 판단된다.

### 4. 결론

고속도로에서 주행하는 버스에 의한 인공적 유도풍의 풍력자원 활용 가능성을 전산유동해석으로 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 중앙분리대의 존재로 인한 버스 주위 유동특성의 변화, 특히 후류에서의 종방향 쌍둥이 와류의 변화를 전산유동해석을 통해 확인하였다.
- (2) 중앙분리대형 풍력발전기의 경우, 버스의 전단부에서 5m/s 정도의 강한 풍속이 발생하나 지속시간이 1초 이내로 매우 짧은 반면, 버스가 지나간 이후 잔류하는 후류에 의해 유도되는 상승풍은 비록 풍속은 1.4m/s 정도로 낮지만 상당 시간동안 지속됨을 확인하였다. 따라서 중앙분리대형 풍력발전기 설계 시 후류영향을 충분히 고려하여  $U_x$  뿐만 아니라  $U_z$  성분까지 풍력발전기 회전에 활용할 수 있도록 고안되어야 할 것으로 판단된다. 풍향은 버스 전·후단 부근에서 변화가 매우 심하게 나타나므로 이러한 풍향조건에서의 내구성을 고려한 풍력발전기 선정이 요구된다.
- (3) 교통표지판형 풍력발전기의 경우, 버스의 전면부에서만 유의한 풍속이 유도되어 버스 길이 만큼의 구간에서 약 2m/s로 유지된다. 하지만 그 외 구간의 유도풍은 매우 미약하며 자연풍과 상쇄될 경우를 고려하면 풍력발전에 이용하기에는 실용성이 거의 없을 것으로 판단된다. 더욱이 주행차량의 절반을 차지하는 소형승용차 및 저속차량 등을 고려한다면 실제적 활용 가능성은 희박하다고 보아야 할 것이다.

### 후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원 기본사업(풍력발전 핵심 기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] MetropolisMag.com, “Mark Oberholzer explores the urban highway’s potential for wind power”, <http://www.metropolismag.com>
- [2] Today.com, “Design student invents radical highway wind turbines”, <http://www.archinect.com/schoolblog/>
- [3] Cooper, K.R., 1985, “The Effect of Front-Edge Rounding and Rear Edge Shaping on the Aerodynamic Drag of Bluff Vehicles in Ground Proximity”, SAE paper No. 850288.
- [4] Hucho, W.H., Janssen, L.J., Emmelmann, H.J., 1976, “The Optimization of Body Details—A Method for Reducing the aerodynamic Drag of Road Vehicle”, SAE paper No.760185.
- [5] Barlow, J.B., Guterres, R., Ranzenbach, R., 1999, “Rectangular Bodies With Radiused Edges in Ground Effect”, AIAA Paper No. 99-3153.
- [6] Ryu., J.W., Cho., S.K., Yang, J.M., Choi., H.C., Yoo, J.Y., Lee, J.S., 1996, “Effect of Underbody Shape of Road Vehicles on Drag and Lift”, SAE No.96370012.
- [7] Kim, M.H., Kuk, J.Y., Chyun., I.B., 2003, “A Numerical Investigation on Wake Flow Characteristics and Rear-Spoiler Effect of a Large-Sized Bus Body”, KSAE, Vol. 11, No. 2, pp. 126-133.
- [8] Choi, J.H., Lee, S.J., 1996, “Experimental Study on the Drag Reduction of Ground Vehicle Using a Rear-Spoiler”, SAE No.96370047.
- [9] Sinisa, K., Lars, D., 2003, “Numerical Study of the Flow Around a Bus-Shaped Body”, ASME, Vol. 125, pp. 500-509.
- [10] Tsubokura, M. et al., 2008, “Computational visualization of unsteady flow around vehicles using high”, Computer Fluids, doi: 10.1016/j.compfluid.2008.01.020.
- [11] Jang, D.S. et al., 2000, “Numerical Analysis on Flow Field Around a Bluff Body by LES(I)”, Korean Society for Power System Engineering, Vol. 4, No.3, pp. 40-47.
- [12] Kim, H.G., Patel, V.C., 2000, “Test of turbulence models for wind flow over terrain with separation and recirculation”, Boundary-Layer Meteorology, Vol. 94, No. 1, pp. 5-21.

김 현 구



1997년 포항공과대학교 기계공학과 공학박사  
 1998년 미국 아이오와대학교 IIHR 연구원  
 2000년 포항산업과학연구원 책임연구원  
 2005년 한국에너지기술연구원 선임연구원

현재 한국에너지기술연구원 풍력발전연구단  
 (E-mail : hyungoo@kier.re.kr)

우 상 우



2006년 해양대학교 에너지시스템공학과 공학사  
 2008년 해양대학교 냉동공조공학과 공학석사  
 2008년 한국에너지기술연구원 위촉연구원

현재 한국에너지기술연구원 풍력발전연구단  
 (E-mail : woosey@kier.re.kr)

장 문 석



1984년 한양대학교 기계공학과 공학사  
 1987년 한양대학교 기계공학과 공학석사  
 1994년 한양대학교 기계공학과 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 풍력발전연구단장  
 (E-mail : msjang@kier.re.kr)

신 형 기



2005년 서울대학교 기계항공공학부 공학박사  
 2006년 한국에너지기술연구원 선임연구원

현재 한국에너지기술연구원 풍력발전연구단  
 (E-mail : hkeewind@kier.re.kr)