

건물 풍력발전을 위한 집풍장치 성능 연구

신재렬** · 박재근* · 김한영* · 김대영*

Performance Study of Wind Augmentation Device for Building-integrated Wind Power

Jae-Ryul Shin**, Jae-Jeun Park*, Han-Young Kim*, Dae-Young Kim*

Key Words : Wind Tunnel Test(풍동실험), Wind Augment Device(집풍장치), Building-integrated Wind Power(건물일체형 풍력발전), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학)

ABSTRACT

This study is performance estimation of wind augmentation device for BiWP(Building-integrated Wind Power) which recently attracts attention as a local power. various structures are installed on a rooftop of residential complex buildings. Changing a profile of these, we designed a configuration that is able to capture much air and increase exit velocity. To estimate wind augmented effect of this device, we compared numerical analysis results with wind tunnel test results. Results show that exit velocity is increased from 24% to 60% by wind augmented device on a rooftop of building.

1. 서론

산업혁명 이후 과도한 화석연료의 사용으로 인한 전 세계적 지구온난화로 인해 강력한 태풍과 같은 이상기후 문제가 빈번히 발생하고 있다.

환경문제 및 지구온난화를 극복하면서 지속적인 성장을 도모할 수 있는 청정 에너지원은 물, 바람, 태양, 지열이라고 볼 수 있다. 그러나 이 중에서 물을 이용하는 수력발전 및 조력발전은 환경파괴를 동반한다.

반면, 비교적 환경을 파괴하지 않는 바람 또는 태양광이 신재생에너지로 각광받으며 널리 연구가 진행되어오고 있다. 이들 에너지원 중에서 건물에 직접 적용 가능한 신재생에너지원으로는 태양광, 태양열, 지열, 풍력 등이 있다. 그러나 풍력발전은 현재 육상이나 해상에 대규모 발전단지과 같은 대형시스템 위주로 개발되어오고 있으며, 이렇게 생산된 전기는 단순히 건축물에 공급하는 형태로 되어 있다.⁽¹⁾

최근에 들어 건물과 풍력발전을 일체화하는 건물 통합형 풍력발전과 같이 풍력발전과 건설기술의 결합이 다양하게 시도 되고 있다. 건물 통합형 풍력발전은 모듈화, 소형화된

풍력터빈을 건물의 일부로서 건물과 일체화시키거나 건물에 설치하여 풍력에너지를 활용하여 건물과 관련된 에너지 및 환경문제를 동시에 해결하고자 하는 시도로서 점차 확대되어 가고 있는 추세이다.

이러한 건물 통합형 풍력발전이 건설 분야에 보다 효과적으로 적용 및 활용되기 위해서는 설치되는 풍력터빈의 기공과 성능 이외에도 낮은 풍력자원으로 인한 건물 풍력발전의 한계 및 제한 등과 같은 문제점을 우선 해결하는 것이 매우 중요하다.⁽²⁾

따라서 본 논문에서는 이러한 건물 풍력발전 문제를 해결하기 위해 건축물(군)에서 발생하는 풍력에너지 집중효과(Wind Energy Concentration) 즉, 풍속이 국부적으로 증가되는 특성을 활용하여 풍력발전량을 증대시키는 것이 가능한 에어포일 형태의 단면 형상을 지닌 집풍장치를 대상으로 전산유체역학과 풍동실험을 활용하여 그 성능과 특성을 평가하였다.

본 연구는 다양한 단면의 전산해석으로부터 단면의 최적형상을 도출하였고, 도출된 최적형상의 집풍장치와 대상 건축물 모형에 대해 3차원 전산해석 및 풍동실험을 통해 집풍장치의 성능을 평가하였다.

* 대우건설기술연구원

† 교신저자, E-mail : jaeryul.shin@daewoenc.com

2. 해석 및 실험방법

2.1 수치해석기법

범용 수치해석 프로그램으로 ANSYS사의 FLUENT 12.1을 사용하였다.

지배방정식은 유한체적법을 이용하여 이산화 되고, 대류 플럭스항은 Roe FDS 기법을 사용하여 차분하였으며, 3차 MUSCL 기법을 이용하여 고차의 공간차분 정확도를 유지하였다. 차분된 방정식은 완전 내재적기법을 이용하여 시간 적분 하였다. 선형화된 방정식은 ILU 반복법과 이중 시간 전진 기법을 사용하였다.

벽면 난류효과의 Wilcox 모델과 전단층 표준 모델 사이의 혼합형 모델 난류모델인 Menter의 SST 난류 모델이 사용되었다. 2차원 단면 형상 선정에서는 정상상태 해석을 수행하였고, 3차원 적용대상 해석에는 비정상상태 해석을 수행하였다.

2.2 풍동실험기법

풍동실험은 본 연구원의 회류형 풍동에서 수행되었다. Fig. 1은 실험모형을 측정부 회전원판에 설치한 실험전경을 보여준다.

이 풍동의 측정부 크기는 가로 3 m, 세로 2 m의 크기를 가지며, 최대 30 m/s의 풍속을 재현할 수 있다. 상부에 부착된 이송기를 이용해 측정 점의 풍속을 열선풍속계(KANOMAX사의 SYSTEM 7202)로 계측하였다. 사용된 열선센서는 KANOMAX사의 0251R-T5모델을 사용하였다.

3. 2차원 단면 형상 선정

3.1 옥상층 장식물

2005년부터 2006년까지 착공된 택지개발지구 내의 친환경 건축물 인증 아파트 20개 단지를 대상으로 평면형상을 분석해보면 탑상형의 L자형 및 양날개형이 27%를 차지하고 판상형의 일자형이 47%를 차지한다.⁽³⁾ 또한, 옥상층에는 열



Fig. 1 풍동실험 전경

리베이터 코어, 배기 및 환기구 같은 부속물들이 있고 여기에 다양한 형태의 옥상 구조물들이 존재한다.

본 연구에서는 다양한 옥상 구조물 중에서 fig. 2과 같이 현재 보편적으로 난간쪽에 설치되어 있는 평판형 구조물에 대한 단면 형상을 변형시켜 집풍장치로 활용할 예정이다.

3.2 2차원 단면 모델 선정

Fig. 2에서 보이는 평판형 단면의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 이와 같은 형상은 유동의 진행방향과 같고 유동이 지나가는 면적의 변화가 없기 때문에 출구의 속도 변화를 얻을 수 없다.

따라서 유동을 가속시키기 위한 다양한 공기역학적 형태의 단면이 채택될 수 있다. 또한, 출구쪽 유속을 일정하게 유지하기 위해서는 옥상부에도 경계층을 줄이는 형상이 필요하게 된다.

본 연구에서는 집풍구조물의 단면형상이 평판, 굽은 판, 반쪽익형, 국자형을 대상으로 하였고, 난간하부 단면형상도 반쪽익형, 무딘형을 선택하여 해석을 수행하였다.

Table 1에는 집풍구조물의 단면형상과 난간하부 단면형상 그리고 난간하부의 위치에 따른 2차원 정상상태 해석결과를 표로 정리하였고, 집풍구조물의 출구면 속도형상을 Fig. 4에



Fig. 2 당사의 수원 천천 푸르지오의 옥상 구조물

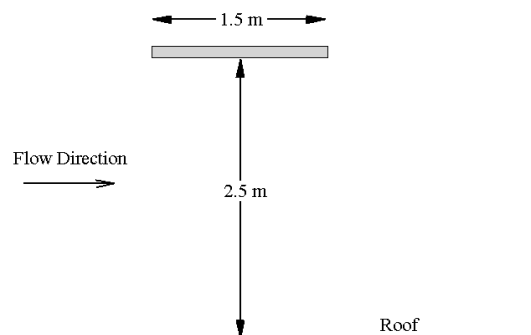


Fig. 3 옥상 평판 구조물 개략도

Table 1 단면 및 난간하부 단면형상, 위치, 출구속도

단면형태	난간하부 단면형태 및 위치	평균속도 (m/s)	증가율 (%)
평판	-	4.08	2.00
굽은 판	-	4.94	23.5
유선형	-	5.01	25.3
	유선형 (앞쪽)	5.04	26.0
	유선형 (뒤쪽)	5.64	41.0
	무딘형 (뒤쪽)	5.41	35.3
국자형	무딘형 (뒤쪽)	5.49	37.3

* 유입 속도 4 m/s

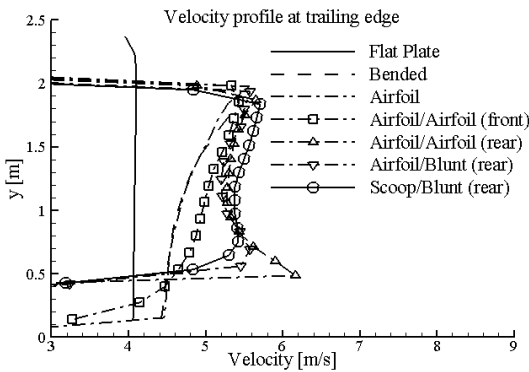


Fig. 4 집풍구조물 출구 속도형상

나타내었다.

유입속도가 4 m/s일 때 집풍구조물의 단면과 난간하부 단면이 모두가 유선형인 형태가 가장 좋은 속도 증가를 보여준다. 이는 단지 공기역학적인 형태의 비교성능 일뿐이고 실제 시공에서 이와 같은 유선형으로 옥상난간 하부 설치할 경우 공정이 복잡해진다. 이 때문에 난간하부 형태는 일반적인 사각형에서 무딘형으로 바꾸어 채택하였다. 이 결과, 집풍구조물의 단면이 국자형이고 난간하부가 무딘형 일 때 유입속도 대비 37% 속도 증가를 보여준다.

풍력터빈으로 유입되는 속도형상이 균일하게 유지되는 집풍구조물 단면형상 및 난간하부 단면형상은 국자형에 무딘형이 다른 형상의 조합보다는 속도형상이 좀 더 일정하게 보인다. 균일한 속도형상을 확보함으로써 풍력터빈의 성능을 잘 확인 할 수 있다. 2차원 해석 결과를 바탕으로 집풍구조물의 단면형상은 국자형, 난간 단면형상은 무딘형으로 선정하였다.

그러나 3차원 건물모델에 위 결과의 집풍구조물 단면형상과 뒤쪽에 위치한 난간하부 단면형상 적용하여 해석한 결과 유입류의 방향이 집풍구조물 전면으로 작용하지 않고 벽면을 따라 흘러가는 유동이므로 난간하부 구조물의 존재 유무에 관계없이 3차원 건물 옥상부에 큰 박리영역이 발생하였다. 따라서 박리 지연을 유도하기 위해 난간하부 구조물을

건물 외곽으로 변경했다.

4. 적용대상 풍동실험

4.1 풍동실험

적용대상 모형은 당사의 수원 천천 푸르지오 아파트의 1:70 크기 축소모형을 제작하여 옥상부에 2차원 해석결과로부터 선정된 집풍구조물을 설치한 그림을 Fig. 5에 나타내었다. 집풍구조물은 전면과 측면 방향의 바람의 영향을 알아보기 위해 L자형으로 건물 외곽에 설치하였다.

본 실험에서 모형 전면의 상류유속은 5 m/s의 층류로 가정하였다. 열선풍속계로 계측지점에서 3초 평균 풍속을 얻기 위해 샘플링 주파수 400 Hz에 1024개의 데이터를 각 측정 지점마다 계측하였다. 또한, 실험은 건물 모형 정면과 모서리로 유입되는 방향에 대해서 실험을 수행하였다. 평균속도 계측지점은 집풍구조물의 Fig. 6 옥상부 평균속도 측정지점 폭(D = 0.05 m)을 기준으로 가로 5D, 세로 6.5D의 격자지점 34개와 높이방향으로 0.012 m 간격으로 4개 지점이고 이를 Fig. 6에 나타내었다.

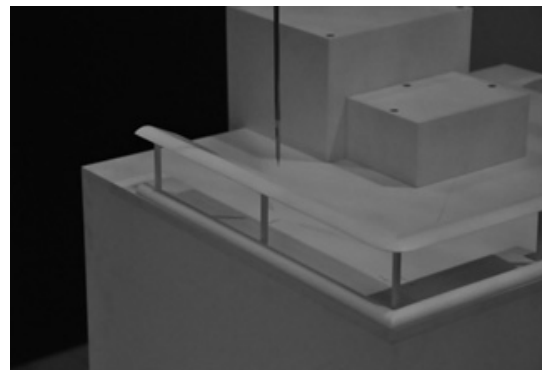


Fig. 5 옥상부 집풍구조물 전경

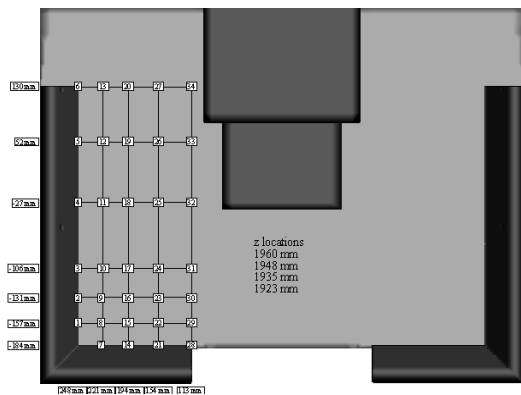
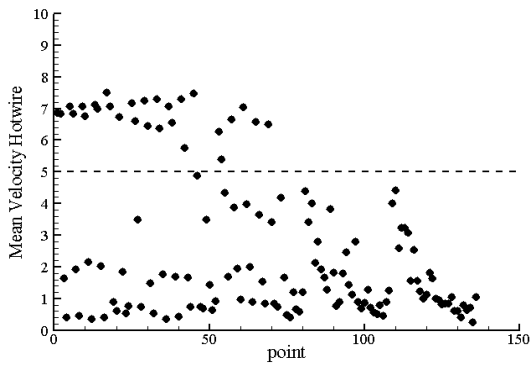
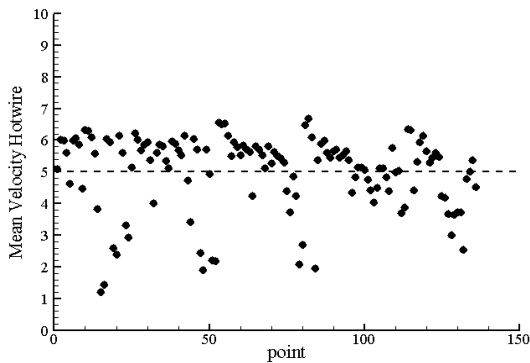


Fig. 6 옥상부 평균속도 측정지점



(a) 정면 풍에 대한 속도분포



(b) 대각선 풍에 대한 속도분포

Fig. 7 옥상부 평균 풍속분포

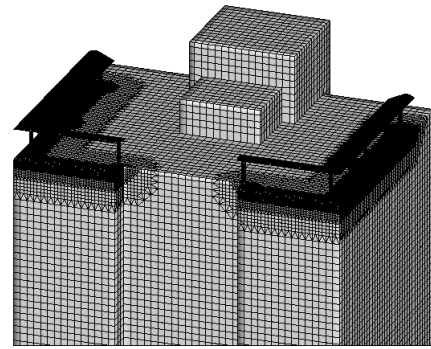


Fig. 8 모델 및 계산격자

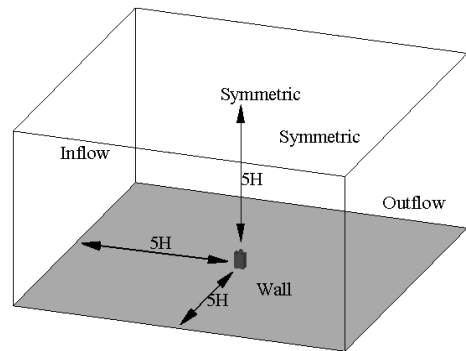


Fig. 9 계산영역

Table 2 해석 조건

구조물	서풍	남풍	남서풍	북서풍
무구조물	○	-	-	-
평판	○	-	-	-
국자형	○	○	○	○

* 서풍은 Fig. 9에서 유입부분으로 들어오는 방향

4.2 옥상부 속도분포

계측된 3초 평균풍속을 정면풍과 대각선풍에 대해서 계측 지점에 대한 속도를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7(a)는 집풍구조물에 정면으로 작용하는 바람에 대한 평균속도분포를 보여주며, 집풍구조물 폭 1D까지의 속도가 유입속도 5 m/s보다 작게는 20%에서 크게는 50%의 속도 증가를 보여준다.

그러나 2D 이상 떨어지게 되면 유입속도보다 낮은 속도의 경향을 보여준다. 대각선으로 작용하는 바람의 경우 Fig. 7(b)는 최대 35%의 속도 증가를 보여주지만 Fig. 7(a)와 달리 2D까지는 유입속도보다 높은 속도를 보여준다.

5. 적용대상 전산해석

5.1 해석모형 및 계산조건

해석 대상 모델은 당사의 수원 천천 푸르지오 아파트이며, 이를 1:70 크기로 축소한 모형을 Fig. 1에 나타내었다. 그리고 Fig. 5의 옥상부 집풍구조물을 함께 모델링 하였다.

모델링에 사용된 프로그램은 Autodesk사의 AutoCAD 및 McNeel사의 Rhino를 사용 하였다. 모델링된 형상은 Sharc사의 Harpoon을 사용하여 사면체 및 육면체격자로 구성하였고, 해석 대상인 옥상부 집풍구조물에 더 조밀하게 하여

전체 120만개 격자로 구성하여 이를 Fig. 8에 나타내었다.

계산영역은 유동 상류 및 유동 하류쪽으로 모형 높이(H=1m)의 5H로 취했다. 그리고 모형의 좌측과 우측 그리고 높이에 대해서도 5H로 계산영역을 구성하였다. 전체 계산영역을 Fig. 9에 나타내었다.

경계조건으로, 유입조건은 실험과 동일하게 5 m/s의 층류로 부여 하였다. 바닥면과 모형은 단열부착조건을 부여하였고, 계산영역의 좌측, 우측 그리고 위쪽은 대칭조건을 부여하였다. 출구는 외삽조건을 부여하였다.

해석조건으로 집풍구조물의 형태 및 유무에 따라 바람이 정면에서 부는 경우와 집풍구조물이 국자형인 경우에는 여러 풍향에 대하여 해석을 수행하였다. 이를 Table 2에 정리하여 나타내었다.

해석조건인 무구조물과 평판 구조물은 국자형 구조물과의 복사부 속도분포 비교를 위해 구조물에 수직으로 유입되는 서풍에 대해서만 해석을 수행 하였고, 국자형 구조물은 다양

한 풍향에 대해서 집풍구조물의 성능을 확인하기 위해 여러 풍향에 대하여 해석을 수행하였다.

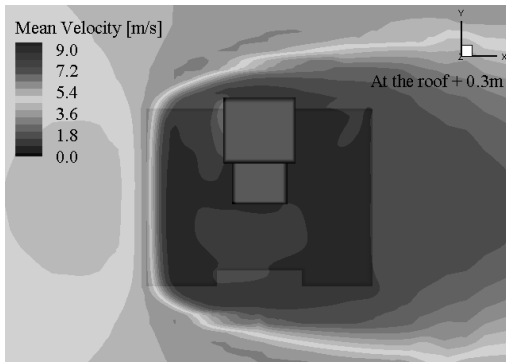
5.2 옥상부 속도분포

Fig. 10의 전반적인 유동은 유동 방해물인 건물 모형 주변으로 돌아가는 현상을 볼 수 있다. 그러나 옥상부의 집풍구조물에 따라 옥상부의 유동은 다르게 나타난다.

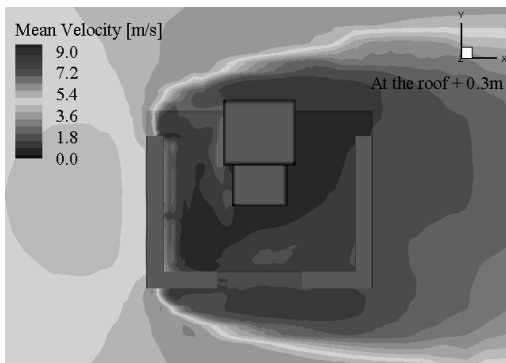
옥상부에서 집풍구조물의 출구 높이 0.3 m 지점에서의 속도분포를 Fig. 10에 집풍구조물이 없는 경우와 평판 및 국자형 집풍구조물에 대해서 나타내었다.

Fig. 10(a)의 집풍구조물이 없는 경우 유입속도 5 m/s보다 낮은 1 m/s 미만의 속도분포를 보여준다. Fig. 10(b)의 평

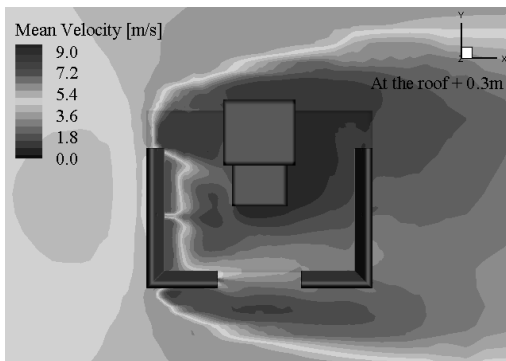
판 구조물의 옥상부 속도분포는 집풍구조물이 없는 Fig. 10(a)보다는 일부 가속을 보여주지만, Fig. 10(c)에 비해서는 가속이 되지 않는 것으로 보인다. Fig. 10(c)에서 집풍구조물



(a) 구조물이 없는 경우

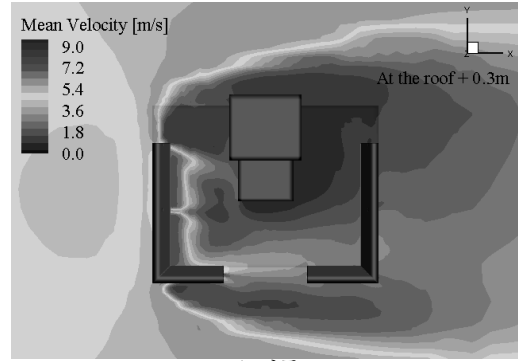


(b) 평판 구조물

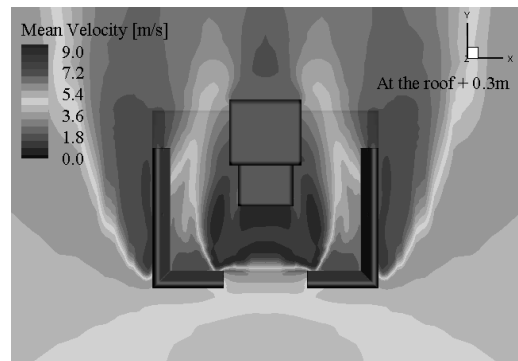


(c) 국자형 구조물

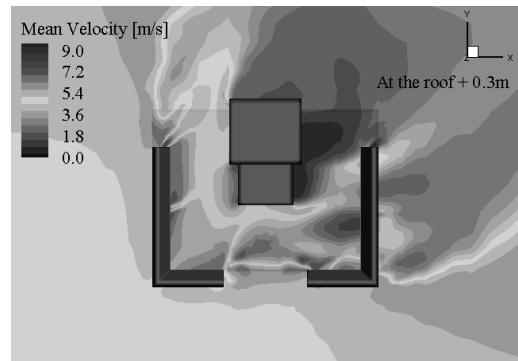
Fig. 10 구조물에 따른 옥상부 속도분포



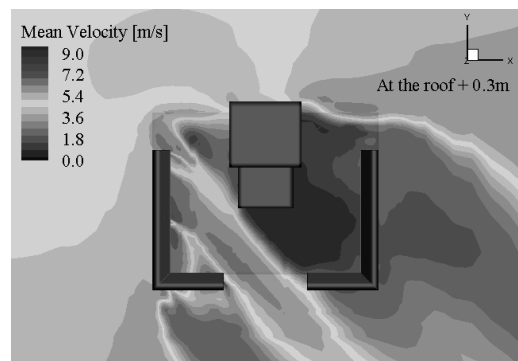
a) 서풍



b) 남풍



c) 남서풍



d) 북서풍

Fig. 11 풍향별 옥상부 속도분포

출구 근방에서 최대 60% 속도증가를 보여준다.

또한 국자형의 경우 건물 모형 근방에서 유입되는 유동이 벽면을 따라 흐르는 유동이기 때문에 유동을 포집해 가속을 원활하게 해주는 것을 알 수 있다.

5.3 풍향별 속도분포

서풍, 남풍, 남서풍, 북서풍의 풍향에 대해 국자형 집풍구조물의 옥상부 속도분포를 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11(a)의 서풍의 경우 최대 8 m/s 속도를 보여 유입속도 대비 60% 속도증가를 보여 준다. 그러나 유입속도인 5 m/s 이상인 옥상부 영역이 구조물 하류 1.5D 정도로 작은 영역을 차지한다. 이와 달리, fig. 11(b)의 남풍인 경우 최대 속도는 7 m/s 정도를 보여 유입속도 대비 40%의 속도 증가를 보여 준다. 그리고 유입속도인 5 m/s 이상인 옥상부 영역이 집풍구조물 하류 4.5D 정도로 서풍에 비해 크게 나타난다.

Fig. 11(c)의 남서풍의 경우 최대 속도는 6.2 m/s이고 유입속도 대비 24% 속도증가를 보여준다. 옥상부에 5 m/s 이상 속도영역에서는 2D 정도 차지한다. 북서풍의 경우 최대 6.8 m/s 속도를 얻을 수 있으며 36% 정도의 속도 증가를 확인할 수 있다. 그리고 옥상부에 5 m/s 이상인 영역은 Fig. 11(d)에서 나타낸 것과 같이 사선으로 길게 늘어져 있다.

Table 3 풍향별 최대속도 및 유효 설치 위치

풍향	속도[m/s]	증가율 %	유효위치
서풍	8.0	60	1.5D
남풍	7.0	40	4.5D
남서풍	6.2	24	2D
북서풍	6.8	36	2D

결과로부터 유입류 속도가 5 m/s인 경우 국자형 집풍구조물을 통과하면 최소 24~60%의 속도 증가를 확인할 수 있고, 풍력터빈을 설치할 경우 집풍구조물의 폭의 2D 안으로 설치해야 할 것으로 판단된다. 이를 Table 3에 정리하여 나타내었다.

6. 결과비교

6.1 출구속도 비교

Figs. 12와 13에 측정지점의 속도형상을 풍동실험 데이터와 전산해석결과를 비교한 그림이다. 그림에서 측정지점은 집풍구조물의 출구면에서의 속도형상을 나타낸 것이다.

측정점 1~3, 5는 Fig. 6에서와 같이 집풍구조물의 장변 방향에 대한 출구면이고, 측정점 7과 21은 단변방향에 대한 출구면이다.

Fig. 12의 서풍인 경우, 측정지점 1, 2, 3, 5는 유동과 교차해 있는 집풍구조물의 속도 증가가 크게 나타남을 알 수 있고, 측정지점 7, 21의 경우 유동과 평행하게 있어 속도 증가를 크게 기대할 수 없다. 이 결과는 Fig. 11(a)의 서풍의 계산결과가 실험과 유사함을 보여준다.

남서풍이 부는 Fig. 13의 경우 전체적으로 유입속도에 대비해 속도증가가 크지 않다. 그러나 전체적으로 유입속도를 초과하는 부분이 고르게 나타남을 알 수 있다. 이 또한 Fig. 11(c)의 계산결과에서도 확인할 수 있다. 전체적으로 유입속도에 비해 24% 속도 증가를 보여주고 유입속도를 초과하는 부분이 옥상부의 대부분을 차지한다. 이로부터, 풍력터빈의 설치 위치는 유동과 집풍구조물이 교차하는 풍향에 대해서 집풍구조물 폭의 1.5D 후방까지 설치하면 타당하다고 생각한다.

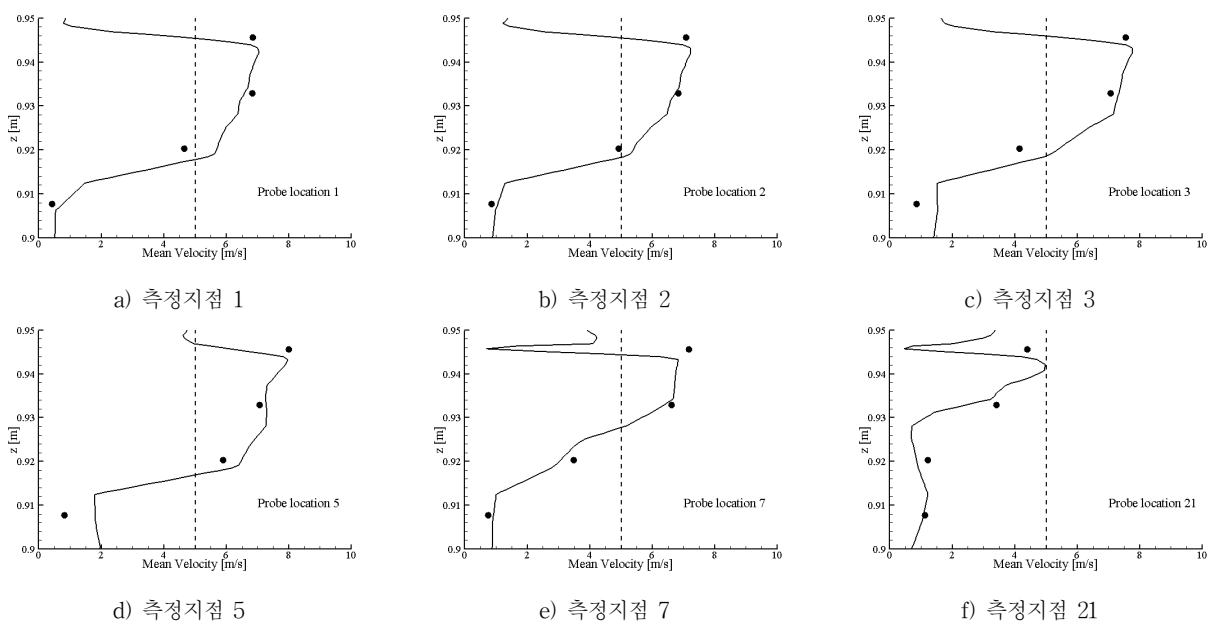


Fig. 12 서풍일 때 측정지점별 속도형상

6.2 성능

풍력발전기의 출력은 다음의 식으로 나타낸다.

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (1)$$

식 (1)은 공기의 밀도, ρ , 블레이드의 직경, R , 유입속도, v 로 나타내며, 블레이드 직경이 고정되면 출력은 유입속도의 세제곱에 비례한다.

현재 고려되고 있는 풍력터빈은 풍향에 대해 무지향성을 가지는 수직형 블레이드가 장착된 풍력발전기이다. 현실적인 성능을 도출하기 위해 200 W 급의 Cygnus-Mill의 풍력발전기(4)의 속도-출력 표를 보간하여 기계적 손실이 포함된 보간식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = 2.91v^{1.93} \quad (2)$$

식 (2)를 이용해 해석된 결과의 최대속도 값을 이용해 계

Table 4 구조물 및 방향에 따른 속도 및 출력

구조물	풍향	최대속도 [m/s]	속도증가율%	출력 [W]	출력증가율%
무구조물	서풍	0.4	-92	0.5	-99
평판	서풍	1.9	-62	9.0	-86
국자형	서풍	8.0	60	159	145
	남풍	7.0	40	123	89
	남서풍	6.2	24	97	49
	북서풍	6.8	35	116	78
유입풍속		5.0	-	65	-

* 증가율은 유입속도 대비로 표시

산하여 Table 4에 속도증가율, 출력증가율을 나타내었다.

단순 유입풍속으로 계산된 출력이 65 W이고 이를 기준으로 구조물의 형상과 풍향에 따른 출력에서 구조물이 없는 경우와 평판 구조물의 경우 풍력발전기의 출력이 발생하지 않는 것으로 판단된다.

국자형 집풍 구조물과 유동이 교차하는 서풍의 경우 최대 159 W의 출력을 보여주며 유입속도에 따른 출력 대비 145 %의 출력 증가를 보여 준다. 국자형 집풍 구조물의 경우 풍향에 따라 속도증가는 최소 24 %에서 최대 60 %이고, 출력의 경우 최소 49 %에서 최대 145 %의 속도 및 출력의 증가를 확인할 수 있다.

7. 결론

본 연구는 건물풍력발전을 위해 일반적인 건물의 옥상층 구조물을 집풍이 가능한 형태로 변경하여 풍력터빈의 성능 및 설치 위치를 확인하기 위한 연구이다.

2차원 전산해석 결과인 국자형 집풍구조물과 무딘형 난간이 유입풍속 대비 37 %의 속도 증가를 보여 주었다. 2차원 전산해석으로부터 선정된 모델을 건물 모형에 적용하여 풍동실험 및 3차원 전산해석을 수행한 결과 유입속도 대비 최저 24 %에서 최대 60 %의 속도 증가를 확인하였고, 발전기의 출력으로는 50 %에서 145 %까지의 출력 증가를 확인할 수 있었다.

또한, 건물 옥상의 다양한 구조물의 형상과 위치에 따라 풍력발전기의 출력에 영향을 많이 미친다. 본 연구에서는 옥상부 구조물 중 대표적인 엘리베이터 코어만 고려한 집풍구조물 해석에서 풍력터빈의 설치 위치는 풍향에 대해서 집풍

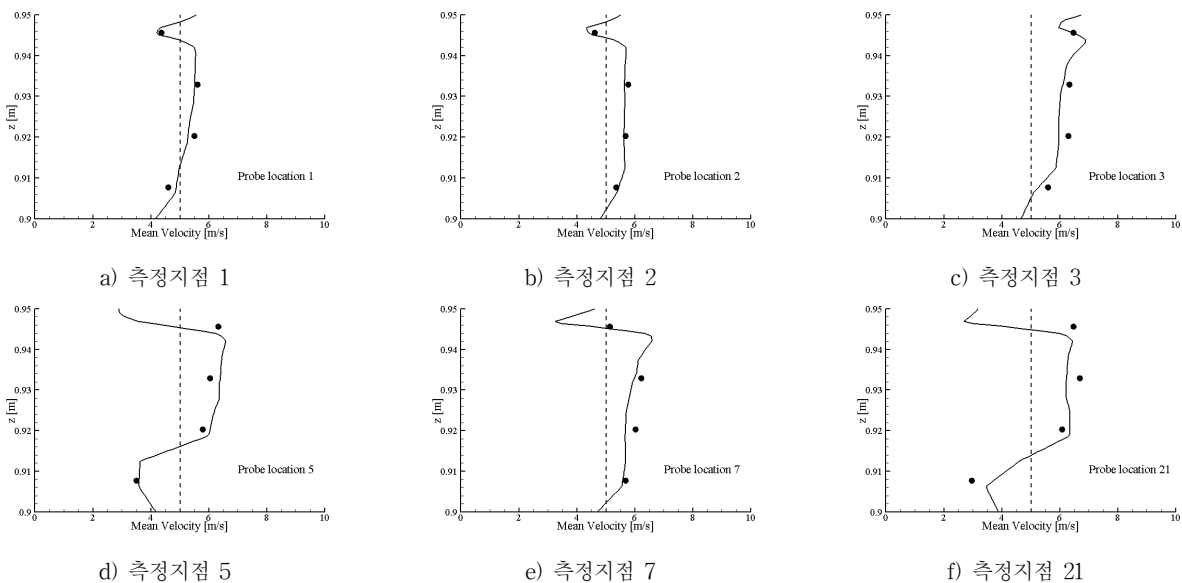


Fig. 13 남서풍일 때 측정지점별 속도형상

구조물 폭의 1.5D 후방까지 설치하면 타당하다고 판단된다.

향후, 실증 및 적용에서는 각 지역별 평균풍속, 건축물 높이 및 옥상층 구조물들을 고려하여 풍력발전기의 설치 위치의 전산해석 및 성능계산을 통해 풍력발전기의 선정 및 건축물 설계에 반영되어야 한다.

후 기

본 연구는 대우건설기술연구원의 “풍속증강형 건물 풍력발전 시스템 개발” 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) 윤종호, 2008, “건물일체형 풍력발전 기술현황,” 한국건축친환경설비학회지, 제2권, 제1호, pp. 54~58.
- (2) 김용이, 2011, “건물 일체형 풍력시스템 디자인 고찰,” 유체기계저널, 제14권, 제4호, pp. 64~69.
- (3) 박은태, 강병근, 2007, “친환경 건축물 인증 아파트 단지 일조환경 분석에 관한 연구,” 대한건축학회지, 제23권, 제9호, pp. 3~13.
- (4) Cygnus-Mill 성능곡선, <http://www.wind-smile.com/news/products/turbine-200w.htm>