

## 풍력발전기가 설치된 고층빌딩에 대한 전산유체역학적 고찰

전완호 · 윤성욱 · 김 욱 · 조장형

씨딕 기술연구소

(2009년 6월 17일 접수; 2009년 6월 22일 수정; 2009년 7월 17일 채택)

### CFD Analysis on a Tall Building Augmented Wind Turbine

Wan-Ho Jeon, Seong-Wook Yoon, Wook Kim and Janghyung Cho

CEDIC Technical Research Center, Seoul 153-783, Korea

(Manuscript received 28 May, 2009; revised 19 June, 2009; accepted 22 July, 2009)

#### Abstract

Renewable energy or green energy is a hot issue in these days. Since wind resource can be endlessly supplied by nature, researchers and common people are interested in study how to use that resource at home or company. Especially, many architects have tried to integrate wind power generator for a part of building. So in this paper, three buildings installed wind power turbine are targeted to CFD analysis and these buildings are Bahrain trade center, Discovery tower, and Pearl river tower. Bahrain trade center is the first building installed real wind turbine, Discovery tower is constructing at Texas, and Pearl river tower is designed and proved by china researchers. These buildings have very different type of wind power turbine and each turbine has different conditions for best power generation. Therefore this paper will focus on characteristic shape of buildings, wind power turbine type, and expected purpose of construction. Moreover, CFD analysis will show wind flow pattern and wind speed while wind is passing through wind turbine of three tall buildings. CFD analysis for three buildings make comparison the wind flow patterns with experimental result.

**Key Words :** CFD (Computational Fluid Dynamics), BAWT (Building-Augmented Wind Turbine), Tall building

#### 1. 서 론

신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데 특히 풍력발전은 무한한 풍력자원을 이용한 재생에너지라는 점에서 의미가 크다. 현재의 추세는 예전에는 대규모 풍력발전 단지에서 전력을 생산해 내는 발전사업이 풍력발전의 핵심을 이루고 있지만

도심 건물군에도 소형 풍력발전기를 도입하려는 시도 역시 꾸준히 이루어지고 있다.

일례로 가정집이나 아파트 빌딩에서도 소형 수직 풍력 발전기를 이용하여 최대 전력사용량의 20% 까지 자가발전을 목표로 한 에너지 절약을 들 수 있다. 그림 1은 건물 옥상에 설치된 수직축 풍력발전기의 예를 보여 주고 있다. 이 경우 건물에 의해 복잡하게 형성되는 대기유동장의 특성을 고려하여 풍력발전기에 가장 효과적인 위치를 판별하는 것이 관건일 것이다<sup>1,2)</sup>.



Fig. 1. Vertical wind turbine installed on top of a building.

최근에는 건물 옥상이나 가정집에 설치하는 소형 풍력발전기가 아니라 풍력발전기를 초고층 빌딩의 한 부분으로 흡수하여 보다 효율적으로 전력을 생산할 수 있는 방법을 많은 건축가들이 찾고 있다. 이는 초고층 빌딩이 더 이상 단순한 높이의 랜드마크 경쟁에서 벗어나 환경 친화적이라는 상징성까지 제공해야 한다는 패러다임이 생겨나기 시작한 것이라고 생각된다.

우리나라도 제 2 롯데월드, 상암 월드컵 경기장 인근의 고층 빌딩, 그리고 한강변을 따라서 세워질 고층 아파트들은 단지 보기 좋은 고층 건축물이 아닌 스스로 에너지를 자급할 수 있는 친환경적인 건축을 추구하며 모두 풍력발전기 설치를 적극적으로 고려하고 있다.

해외에서는 2008년 건설된 두바이 무역센터(그림 2)가 풍력발전기와 융합된 전 세계의 대표적인 상징 건물로 자리매김 하였으며 이는 풍력발전 융합형 초고층 건물의 효시라고 할 수 있다. 풍력발전은 단순히 상징성 뿐만이 아니라 초고층 빌딩에서 요구하는 엄청난 전력사용량을 일부라도 자급하기 위한 실용적인 대안이기도 하다. 즉, 건물 일체형 풍력발전이란 100 m 이상의 높이에서의 지상보다 월등한 풍력자원을 이용하여 수직축 또는 수평축 풍력발전기를 건물의 외벽이나 또는 옥상에 배치하여 전력을 생산한다는 것이다<sup>3)</sup>.

WEB(Wind Energy for the Built Environment)이란 건축가들로 구성된 단체의 프로젝트로 최근의 핫 이슈인 신재생에너지를 모든 방법을 동원하여 건축



Fig. 2. Bahrain World Trade Center. (50 stories, 240 m height)

물에 도입함으로써 건축물의 실용성을 극대화함을 목적으로 하고 있다.

이런 목적을 달성하기 위해서는 가장 먼저 건물 주위의 대기유동장에 대한 정확한 이해가 필수적이며 복잡한 도시 건물군 및 건물형상의 복잡성을 고려할 때 가장 효과적인 예측방법은 전산유체역학(CFD; Computational Fluid Dynamics)일 것이다. 현재에도 고층 빌딩의 설계평가 시 풍동실험과 아울러 CFD에 의한 풍환경 평가는 필수적인 과정이다. 단, 기존의 풍공학적 측면에서 정적/동적 풍하중의 파악에 초점을 두고 있는 건축물 풍환경 평가와 풍력발전기 설치위치 및 운영조건을 파악하기 위한 풍력자원평가는 비록 CFD라는 동일한 해석수단을 사용하지만 그 해석방법이 매우 상이하게 된다.

본 논문에서는 현재 전세계의 이목과 관심이 집중되고 있는 3개의 초고층 건축물을 다루고자 한다. 즉, 현재 건설되었거나 건설 예정인 초고층 건축물 주위의 대기유동장을 CFD로 해석하여 고층 빌딩에 의하여 변형되는 바람장과 특성을 정성적, 정량적으로 평가함을 연구목적으로 한다.

## 2. 전산유체역학 해석법

전산유체역학(CFD) 해석은 비선형 미분방정식인 나비에-스톡스 방정식(Navier-Stoke Equation)을 유한체적법(FVM; Finite volume method)으로 이산화하여 변환된 대수방정식을 수치해석법으로 풀어내고

그 결과를 분석하는 일련의 과정을 말한다. 초창기 컴퓨터로는 비선형 미분방정식을 풀기가 어려웠으나 전산환경의 비약적인 발전에 힘입어 현대에는 실로 복잡한 형상 및 현상에 대한 전산유체역학 해석이 가능하게 되었다.

건물 주변의 대기유동 현상을 실제와 같은 차원에서 해석하기 위해서는 건물의 급격한 형상변화에 따른 유동박리의 정확한 해석을 위해 난류모델(turbulence model)의 사용이 필수적이며, 본 해석에서는 RNG k-ε 난류모델을 사용하였다.

이번 해석에 사용된 전산유체역학 프로그램은 사용툴은 STREAM으로 건축, 산업지역, 대도시 등과 같이 대공간, 대용량의 해석 분야에 대한 전문적인 전산유체역학 프로그램이다.

난류모델은 6가지 이상의 모델을 가지고 있으며, 이번 해석을 위해서는 건물에 의한 박리 현상을 가장 정확하게 해석 할 수 있는 RNG k-ε 난류모델을 선택하여 해석을 수행하였다.

### 3. 초고층 빌딩의 전산유동해석

본 연구에서는 건물일체형 풍력발전기(BAWT; Building-Augmented Wind Turbine)를 장착한 고층 건축물 3개를 대상으로 설정하였다. 그 중 바레인의 국제무역센터(World Trade Center)는 완공된 유일한 건물이며, 미국 디스커버리 타워(Discovery Tower)는 건축 중에 있으며 중국의 펄리버 타워(Pearl River Tower)는 아직 설계단계에 있는 건물이다.

바레인 국제무역센터(그림 2)는 두 개의 직각 삼각형 건축물을 연결하는 가교에 수평축 풍력발전기를 설치하는 형식을 채택하였고, 미국 텍사스에 건축 중인 디스커버리 타워(그림 3)는 건물 옥상의 전면부에 풍력발전기를 설치하는 형식을 채택하였으며, 중국 광저우에 건설 될 펄리버 타워는 건물 중간층에 건물 내부를 관통하는 유로를 만들고 수직축 풍력발전기를 설치하게 된다고 한다.

이들 고층 건물에 대해 바레인 무역센터와 펄리버 타워는 전산유체역학적 해석을 통하여 정성적 풍환경 특성을 고찰하였고 디스커버리 타워에 대해서는 이에 덧붙여 풍동실험 결과와의 비교를 통한 정량적 해석을 수행하였다.

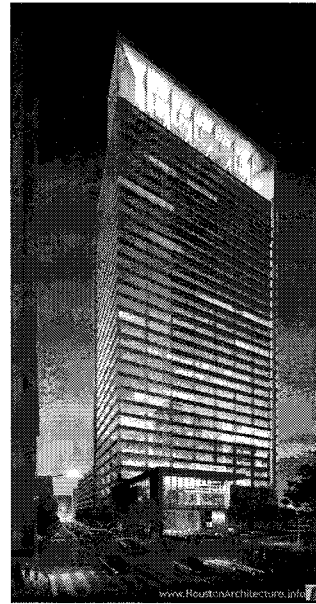


Fig. 3. Discovery Tower in Houston. (under construction, 31 stories, 147 m height)

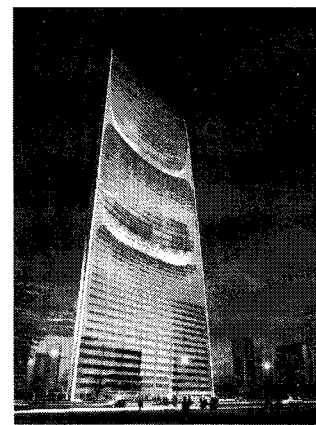


Fig. 4. Pearl River Tower in Guangzhou. (design, 71 stories, 309.6 m height)

#### 3.1. 텍사스 디스커버리 타워

2008년에 착공하여 2010년 준공 예정인 미국 텍사스 휴스턴에 위치한 디스커버리 타워는 건물의 옥상에 수직축 풍력발전기를 설치하여 전력생산을 하는 총 31층, 147 m 높이의 건물이다. 건물 높이는 다른 고층건물들에 비해서 높지는 않지만 풍황조건이 우수한 텍사스에서는 풍력발전의 효과가 클 것으로 기대되는 상징적 건물로 세간의 주목을 받고

있다.

디스커버리 타워에 대한 풍동실험은 미국 콜로라도의 CPP Wind Engineering Consultant에서 수행하였는데, 이 회사는 풍환경 풍동실험으로 유명한 콜로라도주립대학의 Cermak 교수가 설립한 매우 유명한 회사이다. 풍동실험을 위한 축소모형 사진을 그림 5에 제시하였는데 그림 중간에 하얀 색으로 구별되는 건물이 디스커버리 타워이다<sup>4)</sup>.

그림 6은 고층빌딩을 향해서 불어오는 바람이 건물 주변에서 어떻게 변화하는가를 보여주고 있는데, 일반적인 고층 건물은 대부분 사각기둥이며 직각의 날카로운 모서리를 가지고 있기 않기 때문에 대부분 유사한 풍환경 특성을 갖는다. 즉, 그림 7은 그림 6과 거의 비슷한 형상을 가진 디스커버리 타워의 CFD 해석결과로, 바람이 건물을 만나면서 사방으로 갈라지는 현상을 유선(streamline)으로 표현하였으며 그 형태는 그림 6의 일반적인 유동형태와 잘 일치함을 알 수 있다.

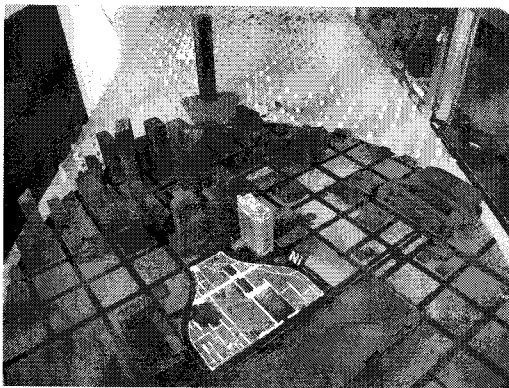


Fig. 5. Alignment of the discovery tower in Houston, Texas is worked in wind tunnel.

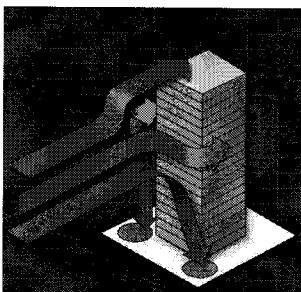


Fig. 6. Wind flow around a tall building.

풍동실험 결과에 의하면 디스커버리 타워는 건물 정면으로 불어오는 바람에 대해서 풍력발전기 설치 구간을 통과하는 바람의 풍속이 가장 높았으며 건물의 양 방향에서 불어오는 바람에 대해서는 상대적으로 미약한 풍속이 측정되었으며 이는 유체역학적 직관으로도 예측되는 바이다. 이러한 경향을 그래프로 표현한 그림 8을 보면, 수직축은 풍력발전기 설치위치에서의 평균풍속( $U_{mean}$ )과 원방 접근풍속( $U_{reference}$ )의 비이며 수평축은 접근풍의 풍향으로, 건물 정면으로 불어오는 남서풍(SW)의 경우가 가장 비율이 높게 나타남을 알 수 있다. 그림에서 선으로 표시된 것은 풍동실험 결과이며 빨간색 점은 본 연구의 CFD 해석결과로 정면 바람의 경우를 비롯하여 대표적인 네 방향에 대한 해석결과가 매우 잘 일치 하는 것을 볼 수 있다<sup>5)</sup>.

그림 9는 디스커버리 타워에 대한 CFD 해석결과 중 건물 정면 및 후면에서 바람이 부는 경우에 대한 풍속분포도를 보여주고 있다. 즉, 그림 9 (a)는 건물 정면으로 오른쪽으로부터 왼쪽으로 남서풍이 부는

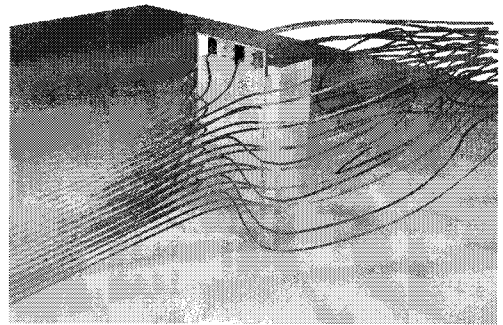


Fig. 7. Streamlines around a tall building predicted by CFD.

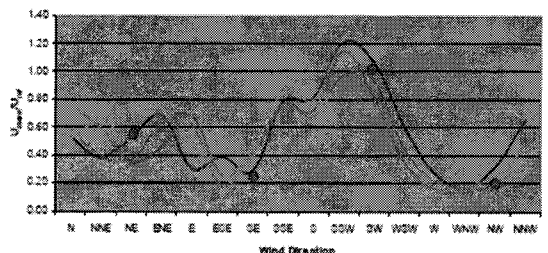


Fig. 8. Mean longitudinal wind speed distribution vs. approach wind direction. (red dots: the present CFD results)

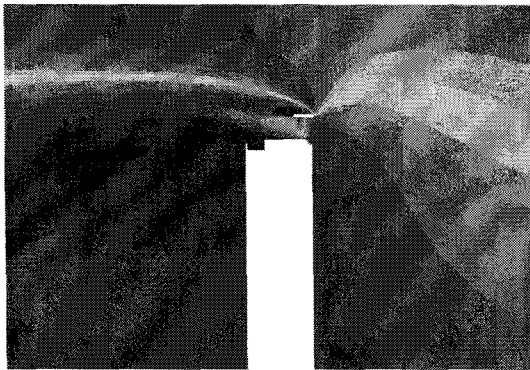
경우이며 건물에 의해 변곡된 바람이 풍력발전기 설치부위를 통과할 때 강한 가속효과가 나타남을 잘 보여주고 있다. 반면 그림 9 (b)는 건물 후면으로 왼쪽으로부터 오른쪽으로 북동풍이 부는 경우이며 건물 종단에서 유동박리가 발생하여 풍력발전기 설치부위가 재순환 영역에 포함됨에 따라 상대적으로 풍속가속의 이점이 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 이것이 건물 정면으로 부는 남서풍에 비해서 저속의 풍속분포를 보이는 이유이다.

그림 10은 디스커버리 타워의 수직평면에 직각은 네 풍속 즉, 남서풍(SW), 북서풍(NW), 북동풍(NE) 그리고 북서풍(NW)에 대한 해석결과를 옥상의 풍력발전기 설치위치에서 지표면과 수평으로 절단한 단면의 풍속분포로 나타낸 것이다. 남서풍(SW)의 경우 앞에서 분석한 바와 같이 건물 정면에서 불어오는 바람의 가속효과가 탁월하여 가장 강한 바람

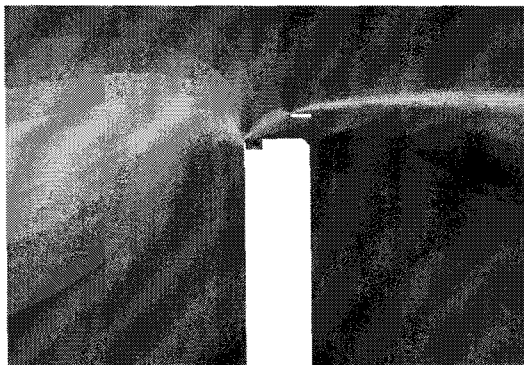
이 유도되며 그 반대 풍향인 북동풍(NE)의 경우에도 가속효과가 있는 것으로 분석된다. 그러나 측풍에 해당되는 북서풍(NW) 또는 남동풍(SE)의 경우에는 직사각 단면의 건물옥상 한쪽 변에만 풍력발전기를 설치하였기 때문에 접근풍에 대해 상대적으로 풍력발전기 배열은 일직선을 이룬다. 이 경우 선단의 풍력발전기 및 지지구조물이 후단을 차폐함에 따라 풍력발전이 원활하지 못할 것임을 알 수 있다. 단, 디스커버리 타워의 경우에는 설치지역의 풍향이 탁월한 하나의 주풍향을 가지기 때문에 이러한 구조의 건물일체형 풍력발전기가 이점을 가지는 것이다. 우리나라와 같이 풍향 변동성이 큰 경우라면 이러한 배치구조는 효율적이라고 볼 수 없을 것이다.

### 3.2. 바레인 국제무역센터

바레인 마나마에 건설된 국제무역센터는 세계 최초로 건물 사이에 수평축 풍력발전기가 설치된 도시적 건물로 그 높이는 240 m이다. 두 동의 대칭을 이루는 직각 삼각형 건물의 상, 중, 하층에 세 개의 다리가 건물을 연결하며, 그 각각의 다리에 블레이드 지름이 29 m인 225 kW 수평축 풍력발전기를 설치한 구조이다. 따라서 총 설비용량은 675 kW며 이로부터 연간 1.3 MWh의 전력을 생산할 수 있다고 한다. 이는 연간 국제무역센터 건물의 전력사용량의 13%에 해당하므로 풍력발전은 단지 외관용이 아니라란 것은 분명한 사실일 것이다.



(a) SW case: flow comes from right.



(b) NW case: flow comes from left.

Fig. 9. Wind speed distribution around the Discovery Tower.

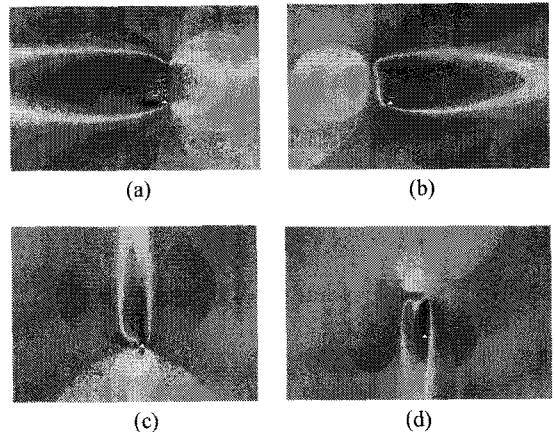


Fig. 10. Wind speed distribution on horizontal plane of building top. (a) wind from SW. (b) wind from NE. (c) wind from NW. (d) wind from SE.

국제무역센터는 그림 11의 풍속분포 평면도에서 볼 수 있듯이 대칭형상의 건물 사이 공간이 벤추리(Venturi) 효과를 낼 수 있도록 설계되었기 때문에 바람을 보다 효과적으로 모아서 풍력발전에 유리하도록 인공적인 풍속강화를 하는 원리가 적용되었다. 그러나 이 경우에도 최적 설계된 주풍향 방향이 아닌 바람이 부는 경우에는 풍력발전이 불가능할

것으로 예상되지만 디스커버리 타워가 건설되는 텍사스 지역과 마찬가지로 국제무역센터가 건설된 바레인 해안지역은 탁월한 주풍향이 존재하므로 이에 최적화 된 건물구조인 셈이다. 그림 11 (b)의 경우 중단부 다리가 설치된 지상 100 m 높이에서의 단면에 해당하며 위에서부터 아래로 북풍(N)이 부는 경우이다. 건물배치에 의해 건물 사이 공간이 좁아짐



(a) Venturi effect at 143 m above ground level.

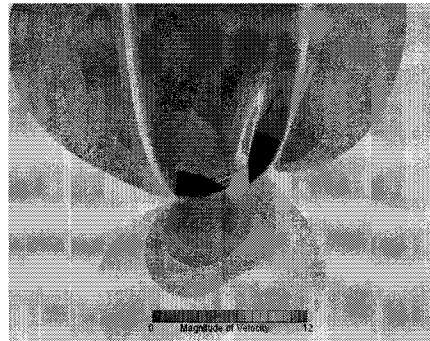


(b) Venturi effect at 100 m above ground level.

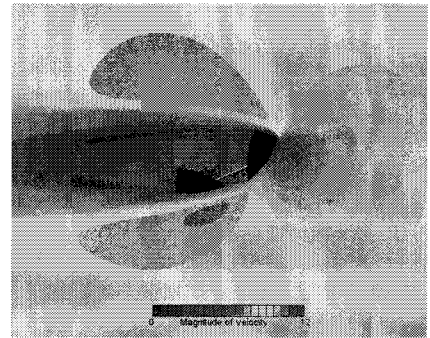


(c) Venturi effect at 73 m above ground level.

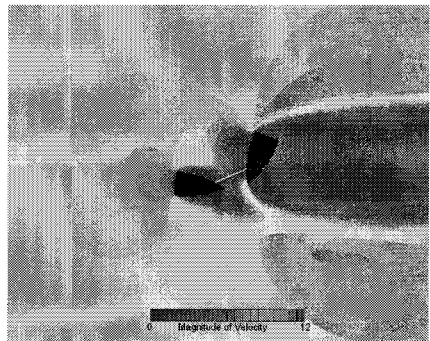
Fig. 11. Wind speed distribution on horizontal planes.



(a) South wind case.



(b) East wind case.



(c) West wind case.

Fig. 12. Wind speed distribution for the other wind directions at 100 m above ground level.

에 따라 풍속이 가속되는 벤추리 효과가 나타나며 풍력발전기 설치위치에 이르러서는 원방 접근풍속보다 10% 정도 가속이 되는 것으로 분석되었다.

그림 12는 나머지 세 풍향(S, W, E)의 경우에 대한 풍속분포도를 도시한 것으로, 주풍향인 북풍 이외에는 벤추리 효과가 나타나지 않음을 알 수 있으며 이러한 건물배치에 의한 풍력발전은 탁월한 주풍향이 존재하는 경우로 국한됨을 알 수 있다. 이러한 사례분석을 통하여 건물일체형 풍력발전기의 설계 시 CFD를 이용함으로써 풍향에 따른 제약성 등을 다각도로 분석할 수 있음을 예시적으로 잘 보여 주고 있는 것이다.

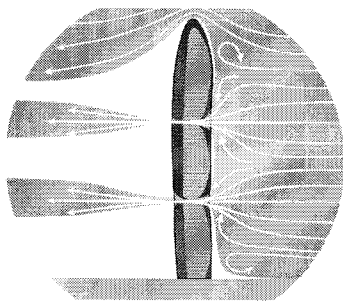
**3.3. 광저우 펄리버 타워**

중국 광저우에 세워질 또 하나의 건물은 풍력발전기가 건물 내부에 설치되는 형태의 건축물이다. 펄리버 타워는 71층에 310 m 높이며 그림 13의 개념도에서 잘 설명되었듯이 건물 중앙 두 부분에 건물을 관통하는 노즐형태의 수평유로를 설치하여 풍속을 가속시킴으로써 풍력발전에 유리한 풍환경을 만드는 아이디어가 적용되었다. 건설사측 발표

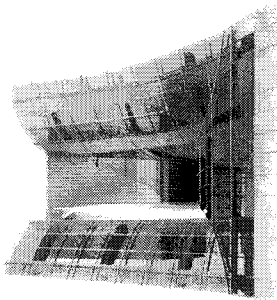
에 의하면 풍속증가가 1.5~2.5배라고 한다. 하지만 펄리버 타워 역시 나머지 경우와 마찬가지로 풍력 발전을 위한 풍향에 제한을 받는 구조이다.

펄리버 타워에 대한 CFD 해석결과를 정면풍과 후면풍에 대해 수직단면에서의 풍속분포를 그림 14에 제시하였다. 설계풍향인 정면풍의 경우에는 노즐형 유로에 의하여 내부 유로에서 풍속이 가속되지만 그 반대의 경우인 후면풍에서는 반대로 감속이 될 것임을 예상할 수 있다. 그러나 두 경우 모두 원방 접근풍이 건물에 의해 차단됨에 따라 건물 상부의 유로로 바람이 몰리며 가속되는 현상은 동일하게 일어남을 알 수 있다.

노즐형 유로가 설치될 높이는 지상 105 m와 210 m 높이이다. 불행히도 건축물의 노즐형 유로 형상에 대한 자세한 도면이 없는 관계로 본 해석에서는 정성적 풍환경 특성을 개략적으로 고찰함이 바람직하다고 사료된다. 당연한 이야기지만 건물 측면에서 불어오는 바람은 건물을 관통하는 유로로 유동이 형성되지 못하므로 풍력발전이 될 수 없다.



(a) Nozzle effect.

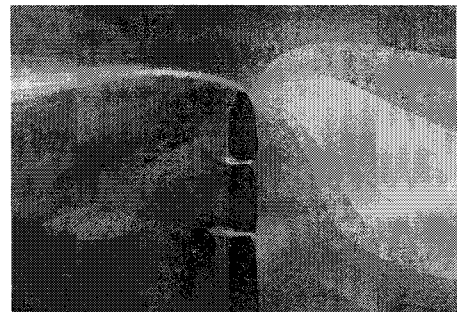


(b) Inlet shape of nozzle.

**Fig. 13.** Wind power generation concept of the Pearl River Tower.



(a) Frontal wind case.



(b) Rear wind case.

**Fig. 14.** Wind speed distribution on vertical cross-section of the Pearl River Tower.



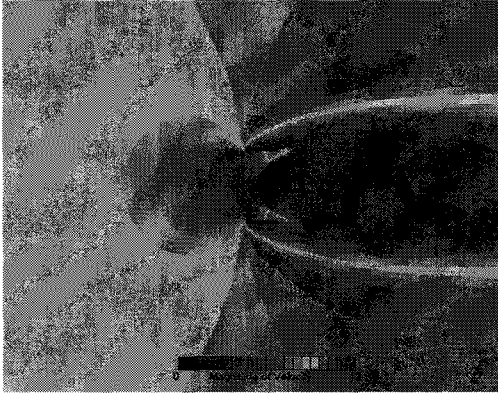


Fig. 15. Nozzle effect in wind power turbine part at 210 m height.

그림 15는 높이 210 m 지점에서 지표면과 수평한 단면에서의 풍속분포도로 건물 내부에서 노즐효과에 의해 풍속이 가속되는 특성을 잘 보여주고 있다. 건물 내부 공간은 노즐효과의 극대화 및 지지구조를 위한 공간 확보를 위해 그림 15와 같이 설계되어 있다.

## 5. 결 론

최근 새로운 패러다임으로 급부상하고 있는 친환경 건물일체형 풍력발전에 대하여 전산유체해석적 고찰을 하였다. 대표적인 건물로 바레인 국제무역센터, 텍사스 디스커버리 타워 그리고 광저우 펄리버 타워에 대해 CFD 해석을 수행하고 이 중 디스커버리 타워에 대해서는 풍동실험과 정량적 비교를 하였으며 나머지 두 건물에 대해서는 풍향별 풍력

발전 효율성을 정성적으로 고찰하였다.

서로 상이한 세 가지의 건물일체형 풍력발전 디자인 모두가 탁월한 주풍향에 적합한 설계라는 점에서 아직은 건물일체형 풍력발전의 제약성을 확인할 수 있었다. 다만 디스커버리 타워와 같이 건물 옥상의 모서리 부근에 설치한 풍력발전기는 나머지 두 경우에 비하여 풍력발전이 가능한 풍향범위가 넓은 것으로 확인되었다.

우리나라와 같이 주풍향이 탁월하게 나타나지 않거나 계절에 따라 주풍향이 변화하는 경우에는 상기 설계들은 적합하지 않다고 판단되며 따라서 우리나라의 풍환경에 적합한 건물일체형 풍력발전 아이디어의 개발이 필요하다고 사료된다.

## 참 고 문 헌

- 1) Brad C. C., Rick R. D., 2008, Integrating Wind Energy into the Design of Tall Buildings - A Case Study of the Houston Discovery Tower, WindPower 2008, Houston, Texas.
- 2) Cermak J. E., 1975, Aerodynamics of Buildings, Annual Review of Fluid Mechanics, 8, 75-106.
- 3) Roy D., Brad C., David B., Graeme W., 2008, Harvesting Wind Power from Tall Buildings, CTBUH 8th World Congress.
- 4) Park J. C., Kyung N. H., 2003, A Study on the Application of Small Wind Power System in Apartment Housing, Journal of the Korean Solar Energy Society, 23(2).
- 5) Kim E. I., 2006, A National Strategy for Wind Power Dissemination, Journal of the Korean Society for New and Renewable Energy, 2(4), 1739-3935.