

소형 풍력발전기를 이용한 교량의 공력성능 개선 및 에너지 생산

Aerodynamic Retrofit of Bridge and Energy Harvesting by Small Wind Turbines

권순덕* · 이승호** · 이한규***

Kwon, Soon-Duck · Lee, Seongho · Lee, Hankyu

Abstract

This study addresses a methodology to use small wind turbines for dual purposes, improving aerodynamic performance of flexible bridges and wind energy harvesting. A way to proper placement of small wind turbines on flexible bridges were proposed according on the analogy of conventional aerodynamic appendages. From the wind tunnel tests, it was found that the wind turbine attached like fairing was effective to reduce the vortex-induced vibration of bridge and the optimal spanwise interval of the wind turbine was 3~4.5 time of turbine diameter. Moreover the aerodynamic coefficients of the bridge were improved after installation of the wind turbines. Present results showed the general availability of wind turbine for improvement of aerodynamic performance and energy supply of flexible bridges although the capacity of wind power generation was strongly dependent on wind characteristics of the bridge site.

Keywords : vortex induced vibration, wind energy, aerodynamic control, bridge vibration

요 지

본 연구에서는 소형 풍력발전기를 교량에 설치하여 전력생산과 아울러 내풍안정성을 개선할 수 있는 방안을 연구하였다. 이를 위하여 기존 공기역학적 진동억제 대책과 유사하게 교량에 풍력발전기를 설치하기 위한 방법과 풍력에너지 추정 방법을 제시하였다. 풍동실험 결과를 보면, 페어링처럼 소형 풍력발전기를 설치하면 와류진동을 거의 억제할 수 있는 것으로 나타났다. 이때 교축방향 최적 이격 거리는 터빈 직경의 3~4.5배인 것으로 나타났다. 그리고 풍력발전기를 설치하면 항력계수는 낮아지고 양력계수의 기울기도 음에서 양의 값으로 바뀌어 전반적인 내풍안정성이 향상되는 것으로 나타났다. 한편 풍하층의 풍력발전기는 평균풍속이 낮아 발전을 못하지만, 풍상층의 풍력발전기는 상당량의 전기에너지를 생산하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 와류진동, 풍력 발전, 공력 제어, 교량 진동

1. 서 론

최근 전세계적으로 신재생 에너지에 대한 관심이 급속히 증가하고 있다. 그 중에서 현재 풍력에너지가 가장 경제성이 뛰어난 관계로 국내외에서 많이 개발중이다. 그런데 풍력에너지는 풍속의 세제곱에 비례하므로 평균 풍속이 높을수록 경제성이 높아진다. 즉 일반 지상보다 높은 곳에 풍력발전기를 설치하면 훨씬 많은 에너지를 얻을 수 있다. 따라서 고가 교량은 풍력발전기를 설치하기에 가장 좋은 장소중의 하나이다. 하지만 교량의 외부에 풍력발전기를 포함한 부착물을 설치하면 일반적으로 정적 풍하중을 증가시키고, 일부 진동까지도 유발할 수 있다. 이러한 이유 때문에 강성이 매우 큰 짧은 교량(BBC, 2008)을 제외하고 아직 교량에 풍력발전기가 설치된 사례는 없다.

장대 교량의 경우에 풍동실험을 통하여 내풍 안정성과 사용성을 사전에 검토한다. 하지만 설계시 풍동실험을 수행한 경우에도 완공후 일부 교량에서 바람에 의한 진동 등이 발생하고 있다. 특히 와류진동이 관측된 사례를 보면 영국의 Erskine 사장교(Hay, 1981), 영국의 Kessock 사장교(Owen, 1996), 미국의 Bronx-Whitestone 현수교(Barelli, 2006), 덴마크의 Great Belt 현수교(Larsen, 1999), 브라질의 Rio-Niteroi 강박스교(Battista, 2000), 일본의 동경만횡단 강박스교(Fujino, 2002), 일본의 文崎高架 강박스교(日本土木學會, 2003)가 있다.

이러한 와류진동을 완화하기 위하여 신설 교량에서는 주로 공기역학적 방법이 사용되며, 기존 교량에서는 공기역학적 방법과 아울러 기계적인 방법이 사용되고 있다. 공기역학적 방법은 페어링, 가이드 베인 등과 같은 부착물을 교량 단면

*정회원 · 교신저자 · 전북대학교 토목공학과 부교수 (E-mail : sdkwon@chonbuk.ac.kr)

**정회원 · 전북대학교 토목공학과 박사과정 (Email : guideth@chonbuk.ac.kr)

***전북대학교 토목공학과 석사과정 (Email : lihan@chonbuk.ac.kr)

외곽에 붙여서 기류의 흐름을 유도한다. 하지만 뭉뚱한 (bluff) 부착물의 경우에는 오히려 공력 성능을 악화시킬 수 있으므로 주의를 요한다.

교량이 풍력 발전을 위하여 좋은 곳임에도 불구하고 풍력 발전기 자체가 일종의 뭉뚱한 구조체이므로 교량에 설치하기 어렵다. 하지만 뭉뚱한 구조물이라 하더라도 적절히 위치시키면 교량의 공력 성능을 개선할 여지는 있다. 이러한 점에 착안하여 본 연구에서는 소형 풍력발전기를 설치하여 교량의 내풍안정성을 개선하면서 동시에 전기 에너지를 생산할 수 있는 방안을 찾는데 목적을 두고 있다. 이를 위하여 공기역학적 부착물의 설치 방법을 응용하여 유연한 교량에 소형 풍력발전기를 부착할 수 있는 방법을 제안하였다. 그리고 와류진동이 발생한 브라질의 Rio-Niteroi교를 대상으로 소형 풍력발전기 설치에 따른 내풍안정성 개선 효과와 아울러 풍력발전량을 추정하여 제시하였다.

2. 소형 풍력발전기를 이용한 공력 성능 개선

2.1 대상 교량

앞에서 언급했듯이 풍력발전기를 설치하면 공력 성능이 악화될 우려가 있으므로 바로 사장교나 현수교와 같은 매우 유연한 교량에 풍력발전기를 설치하기에는 기본적인 연구가 필요하다. 따라서 이러한 연구를 처음 시작하는 입장에서 케 이블 교량보다는 약간 강성이 큰 강박스 연속교를 대상 교량으로 선정하였다.

본 연구서 선택한 브라질의 Rio-Niteroi교는 경간장이 700 m(200 m+300 m+200 m)인 3경간 연속 강박스교이다. 이 교량의 주형은 해면 65 m에 위치하고 있으며, 교폭은 25.9 m이고, 중앙부 박스 높이는 7.42 m이다. Rio-Niteroi교 단면은 두개의 강박스와 강상판 슬래브로 구성되어 있으며, 박스 사이는 트러스 브레이싱으로 연결되어 있다. 교량의 수직 1차 고유진동수는 0.32 Hz이다.

이 교량은 1974년에 완공된 이후 최대 약 ± 25 cm 진폭의 수직 와류진동이 풍속 15~16.5 m/s에서 자주 관측되었다(Battista, 2000). 이를 억제하기 위하여 최근에 무게 각 2.2 톤인 TMD(tuned mass damper) 32개를 강박스 내부에 설치하였다(Battista, 2008). 본 연구에서는 기계적인 제진대책의 대안으로 소형 풍력발전기를 사용하고 동시에 전력까지 얻고자 한다.

2.2 풍력발전기 설치 방법

기계적인 방법과 비교하여 공기역학적 대책은 시간이 지남에 따라 성능이 저하될 우려가 없고, 유지관리도 거의 필요하지 않으며, 설치 비용도 경제적이다. 그림 2에서는 깊은

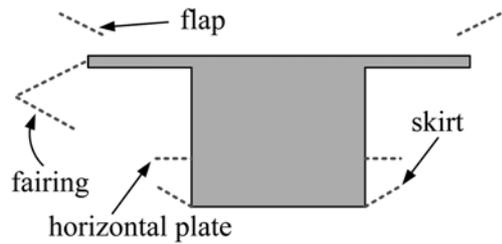


그림 2. 깊은 보의 공력 성능 개선책(Wardlaw, 1992; 日本土木學會, 2003; Simiu and Miyata, 2006)

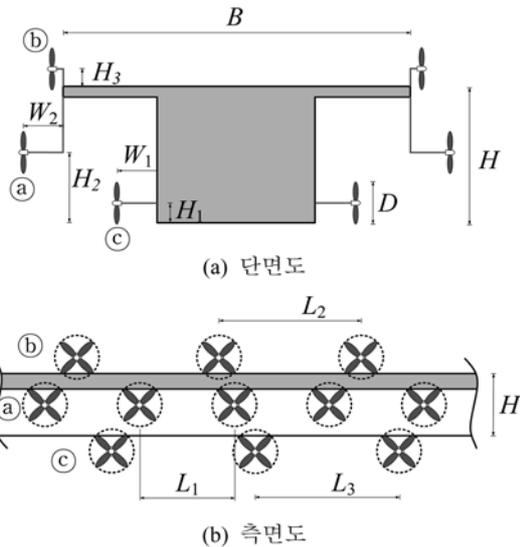


그림 3. 소형 풍력발전기 설치 위치

보에서 주로 사용되는 공력 성능 개선책을 보여주고 있다. 깊은 보에서는 주로 깎로핑이나 와류진동이 발생하는데, 상부의 플랩, 하부의 스커트나 수평판, 그리고 페어링 등이 이용된다(Wardlaw, 1992; 日本土木學會, 2003; Simiu and Miyata, 2006).

앞서 말했듯이 소형 풍력발전기를 잘못 설치하면 역효과가 나므로 공기역학적 부착물과 유사하게 붙이는 것이 유리하다. 그림 2의 방법을 적용하여 소형 풍력발전기를 부착하기 위한 기준을 제안하면 다음과 같다. 아래 각 방법은 그림 3(a)와 (b)에서 찾을 수 있다.

① 페어링 유사법 : 풍상 및 풍하 측면에 설치한 소형 풍력발전기는 기류의 박리를 억제하고 유선형화하는 페어링 역할을 기대할 수 있다.

② 플랩 유사법 : 상부 양단에 설치한 소형 풍력발전기는 단면 상면에서 기류의 재부착을 촉진하는 플랩 역할을 기대할 수 있다.

③ 수평판(스커트) 유사법 : 복부판 하부에 설치한 소형 풍력발전기는 단면 하면에서 기류의 재부착을 촉진하는 역

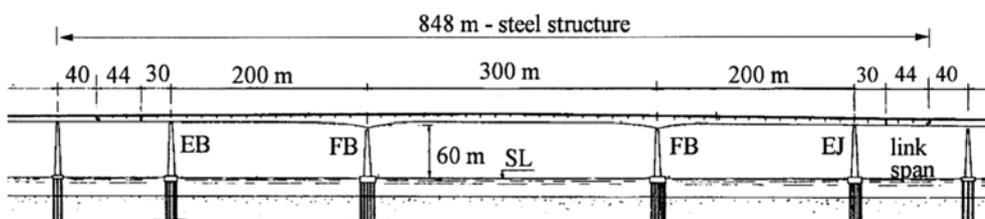


그림 1. 브라질의 Rio-Niteroi교

할 수 평판 혹은 스커트 역할을 기대할 수 있다.

El-Gammal 등(2007)에 의하면 교축 방향으로 사인과 형태로 단면 형상을 바꾸면 와류진동을 줄이는데 효과적인 것으로 나타났다. 이를 소형 풍력발전기에도 적용하면, 풍력발전기를 촘촘히 설치하는 것 보다는 듬성듬성 설치하는 것이 와류진동 억제에 효과적일 수 있다. 따라서 그림 3(b)와 같이 교축 방향 풍력발전기의 간격도 주요한 변수가 된다. 풍력발전기 설치시 교축의 공력 특성을 해석적인 방법으로 구할 수 없으므로 풍동실험을 통하여 적합한 위치를 찾아야 한다. 본 연구에서 풍동실험을 통하여 결정할 변수는 그림 3의 $H_1 \sim H_3$, $W_1 \sim W_2$, $L_1 \sim L_3$ 가 된다.

3. 풍력발전량의 산정

풍력발전은 공기가 가진 속도를 발전기 로터를 통하여 기계적인 에너지로 변환하는 과정이다. 그런데 풍속은 수시로 변하며 불확실하므로 그 자체를 사용하지 않고 확률분포로 변환하여 풍력에너지 산정에 사용한다. 풍력에너지 추정시 일반적으로 다음과 같은 와이블 분포가 주로 사용된다(IEC, 2005).

$$f_v(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (1)$$

여기서 V 는 풍속, f_v 는 풍속의 확률밀도함수, c 와 k 는 각각 척도 및 형상 파라미터이며 최우도법으로 추정한다. 풍력발전기마다 풍속에 따른 출력량이 다르므로 제조사가 제공한 출력곡선을 사용한다. 이러한 풍속에 따른 출력곡선을 P_{wt} 라 할 때 발전량은 출력곡선과 풍속의 확률분포를 곱하고 적분하면 다음과 같다(Chang, 2003).

$$E_{actual} = T \int_0^{\infty} P_{wt}(V) f_v(V) dV \quad (2)$$

여기서, T 는 기간(시간)이다. 와이블 분포는 풍속 0을 포함하지 못하므로 연간발전량(AEP, annual energy production) 계산시 다음과 같이 바람이 불지 않을 시간을 빼주어야 한다(Kwon, 2010).

$$T = 365 \times 24 \times \{1 - f_v(V=0)\} \quad (3)$$

만약 풍향을 고려할 경우에는 각 풍향별로 풍속을 나누고, 그에 해당하는 풍속의 확률분포를 구해야 한다(Manwell, 2003). 풍향을 고려한 연간발전량은 식 (2)에 풍향의 확률밀도함수 f_θ 를 대입하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_{AEP} = T \sum_{j=1}^n \int_0^{\infty} P_{wt}(V) f_{V_j}(V) f_{\theta_j}(\theta) dV \quad (4)$$

연간발전량에 추가하여 풍력발전 성능을 평가하기 위하여 가동률(availability factor)과 이용률(capacity factor)이 자주 사용된다. 가동률은 총 기간중 풍력발전기가 가동된 시간의 비율이고, 이용률은 평균출력(식 (4)를 기간으로 나눈 값)에 대한 정격출력의 비율이다.

풍력에너지를 추정하기 위해서는 풍속자료뿐만 아니라 풍력발전기의 출력도 동시에 필요하다. 따라서 풍력에너지 산

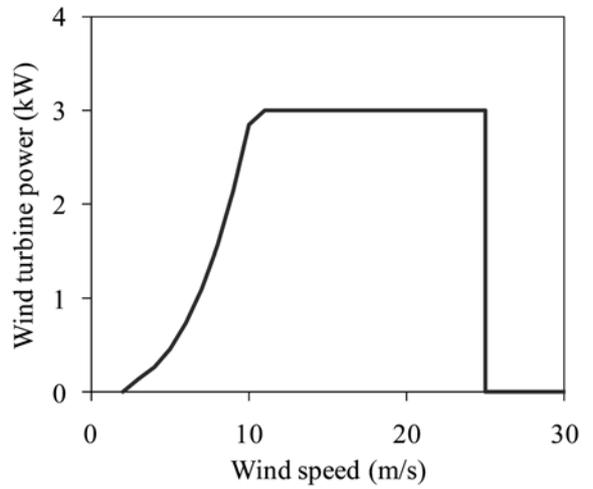


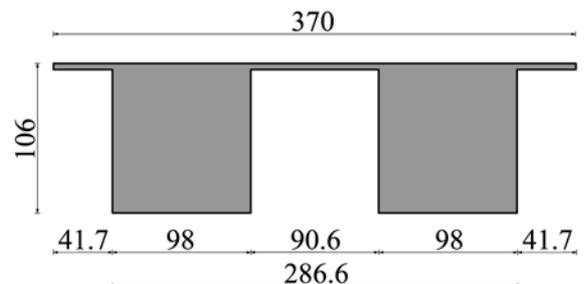
그림 4. 소형 풍력발전기 TA36-3000의 출력곡선

정시 반드시 풍력발전기 기종이 먼저 선정되어야 하며, 본 연구에서는 Traverre Industries(2009)사의 풍력발전기 TA36-3000이 설치된다고 가정하였다. TA36-3000은 블레이드 직경이 3.6 m이고, 정격출력이 3 kW이다. 그리고 풍력발전기 시동풍속, 정격풍속, 정지풍속은 각각 2.7 m/s, 11 m/s, 25 m/s이다. 그림 4에서는 TA36-3000의 출력곡선을 나타내었다.

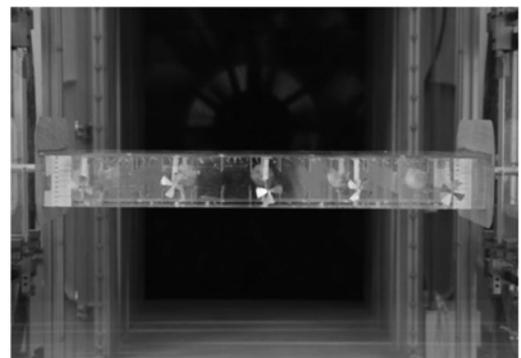
4. 풍동실험

4.1 실험 방법

교축의 부분모형 풍동실험은 전북대학교 소형풍동에서 실시하였다. 실험시 풍속은 피토포와 치압계(Setra 239)를 사용하여 측정하였고, 모형의 변위는 광학식 변위계(Hamamatsu C5949)를 사용하였으며, 실험 자료는 National Instrument사의 PXI 자료수집장치를 사용하여 채널당 400 Hz로 받아들였다.



(a) 풍동실험 모형단면



(b) 풍동실험 사진

그림 5. 풍동실험 모형

풍동실험용 교량 단면은 기본적으로 Rio-Niteroi교와 유사하도록 제작하였으나(Battista, 2000; Battista, 2008) 일부는 단순화하였다. 모형의 축척은 1/70이고, 길이는 0.9 m이며, 구체적인 단면 형상은 그림 5(a)에 나타나 있다. 풍력발전기 모형의 지름은 약 52 mm이며, 축척 때문에 블레이드를 정확히 묘사하지는 못하였고 얇은 금속판으로 제작하였다. 교량 모형에 비하여 풍력발전기 모형의 질량이 미미하므로 추가되는 질량의 영향에 대한 부분은 무시하였다.

풍력발전기에 의한 와류진동 제진 효율을 명확히 파악하기 위하여 등류에서 실험을 수행하였다. 모형의 진동수와 감쇠비는 system identification method로 추정하였다. 기본적으로 모형은 낮은 감쇠비를 유지하도록 하였고, 추가 감쇠는 외부의 오일댐퍼를 사용하여 조절하였다. 그 외 풍동실험 기법은 일반적인 부분모형실험 절차를 따랐다.

모형실험이 Rio-Niteroi교의 실제 거동을 재현하고 있는지 확인하기 위하여 원 단면에 대한 풍동실험을 실시하였고, 그 결과는 그림 6에 나타내었다. 그림에서 보듯이 최대진폭은 구조감쇠비에 따라 다르지만 다음과 같은 관계인 것으로 나타났다

$$z_{\max} = -10.32 \ln(\xi) + 15.337 \quad (5)$$

여기서 z_{\max} 는 최대 수직 진폭이고, ξ 는 구조감쇠비이다. Rio-Niteroi교에서는 풍속 16 m/s 근처에서 최대 진폭 약 ± 25 cm인 수직 와류진동이 관측 되었는데, 본 실험 결과의 감쇠비 0.4%와 유사하다. 이를 볼 때 본 실험은 Rio-Niteroi교에서 발생하는 와류진동을 유사하게 재현하고 있다고 판단되므로 풍력발전기를 이용한 진동제어 연구를 계속 진행하였다. 그리고 지난 35년동안 Rio-Niteroi교에서 수직 와류진동만 관측되었으므로 본 연구에서도 진동 억제에 대한 연구를 와류진동으로 한정하였다.

4.2 매개변수

그림 3에 나타난 풍력발전기 설치 방법에 따라 페어링,

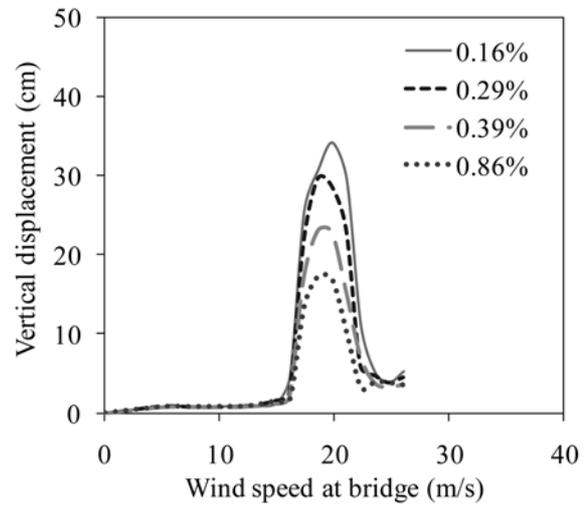


그림 6. 원 단면에서 구조감쇠비에 따른 와류진동 진폭의 변화

수평판, 플랩 유사법을 적용하여 풍력발전기를 교량모형에 설치하였다. 이때 진동제어 효과를 얻기 위한 풍력발전기의 부착 위치를 결정하기 위하여 다음과 같은 변수에 대하여 실험을 수행하였다. ① 수평판 역할을 수행할 경우에 필요한 단면 하부로부터 풍력발전기 중심까지의 높이(H_1) 및 복부판에서 떨어진 거리(W_1), ② 페어링 역할을 수행할 경우에 필요한 단면 하부로부터 풍력발전기 중심까지의 높이(H_2) 및 단부에서 떨어진 거리(W_2), ③ 플랩 역할을 수행할 경우에 필요한 단면 상부로부터 풍력발전기 중심까지의 높이(H_3), ④ 교축방향 풍력발전기의 설치 간격(L_1, L_2, L_3).

표 1에서는 풍력발전기 설치 위치에 따른 실험 케이스와 그 결과를 정리하여 나타내었다. 이때 SD0는 풍력발전기가 설치되지 않은 원 단면에 대한 경우이다. 표 1의 풍력발전기 위치는 터빈 직경(D)과 거더 높이(H)로 무차원화하여 나타내었다. 매개변수 연구시 먼저 플랩, 수평판, 페어링 유사법을 적용하였고, 그 중에서 효과적인 경우에 대하여 교축방향 설치 간격을 조사하였다.

표 1. 실험 케이스 및 결과 (H : 거더 높이, D : 터빈 직경)

Case	풍력발전기 설치위치									최대진폭 (m)
	H_1	H_2	H_3	W_1	W_2	L_1	L_2	L_3	위치	
SD0	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0.34
SD1	×	×	0.1H	×	×	×	3.5D	×	풍상+풍하	0.42
SD2	0.5D	×	×	0.8D	×	×	×	3.5D	풍상+풍하	0.37
SD3	-0.5D	×	×	0.8D	×	×	×	3.5D	풍상+풍하	0.39
SD4	×	0.5H	×	×	2D	1.7D	×	×	풍상	0.29
SD5	×	0.5H	×	×	2D	1.7D	×	×	풍상+풍하	0.19
SD6	×	0.5H	×	×	2D	2.3D	×	×	풍상+풍하	0.15
SD7	×	0.5H	×	×	2D	3.5D	×	×	풍상+풍하	0.10
SD8	×	0.5H	×	×	2D	4.6D	×	×	풍상+풍하	0.08
SD9	×	0.5H	×	×	2D	6.9D	×	×	풍상+풍하	0.26
SD10	×	0.5H	×	×	1.5D	2.3D	×	×	풍상+풍하	0.15
SD11	×	0.5H	×	×	1.5D	3.5D	×	×	풍상+풍하	0.15
SC12	×	0.5H	×	×	1.5D	4.6D	×	×	풍상+풍하	0.25
SC13	×	0.5H	×	×	D	3.5D	×	×	풍상+풍하	0.29

4.3 실험결과 분석

소형 풍력발전기를 그림 3(a)의 ㉠와 ㉡에 나타난 상부 및 하부 플랩과 수평판처럼 부착했을 때 제진 효과는 그림 7에 나타내었다. 그림에서 보듯이 상하부 플랩과 수평판처럼 부착한 풍력발전기는 와류진동을 거의 억제하지 못했다. 플랩이나 수평판은 얇아서 기류를 잘 유도할 수 있지만, 소형 풍력발전기는 직경이 크므로 이러한 기능을 하지 못하는 것으로 판단된다. 그림 8에서는 그림 3(a)의 ㉢에 나타난 페어링처럼 풍력발전기를 설치했을 때 제어 효과를 나타내었다. 풍력발전기를 풍상측에만 설치했을 때보다 풍상 및 풍하 측에 동시에 설치하면 와류진동 억제효과가 더 뛰어난 것으로 나타났다.

풍상하측에 동시에 페어링처럼 풍력발전기 설치시 효과를 자세히 파악하기 위하여 거더 단부와 풍력발전기의 이격거리(W_2)에 따른 영향을 조사하였고, 그 결과는 그림 9에 나타내었다. 그림에서 명확히 보이듯이 풍력발전기가 거더에서 멀리 떨어질수록 와류진동 억제효과는 좋은 것으로 나타났다. 하지만 풍력발전기를 멀리 이격시킬 경우 지지대가 커져야 하므로 이를 고려하여 터빈 직경의 2배까지 시험하였다.

교축 방향으로 교폭에 변화를 주면 와류진동 억제 효과가 생긴다는 El-Gammal 등(2007)의 연구결과를 바탕으로 풍력

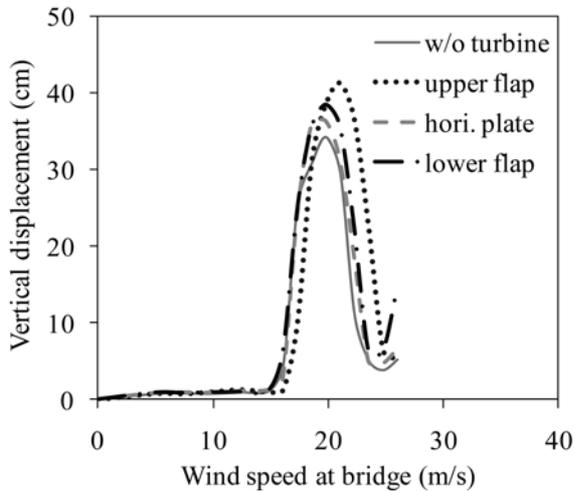


그림 7. 상부 플랩, 수평판, 하부플랩 유사법에 의한 제진 효과

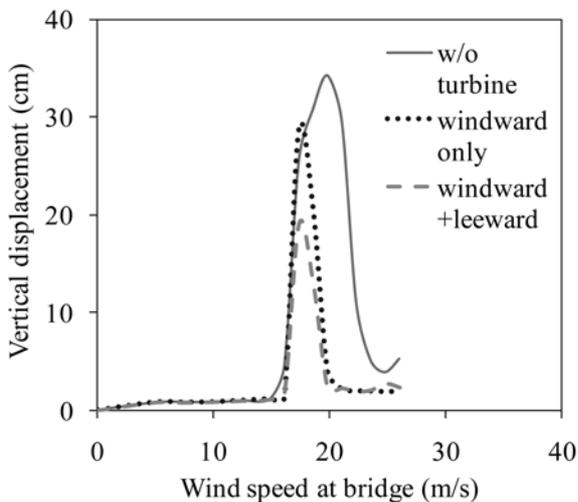


그림 8. 페어링 유사법 적용시 풍상측 및 풍하측 설치여부에 따른 제진 효과

발전기의 간격을 바꾸며 교량의 응답을 구하였다. 그림 10에 서는 교축 방향 풍력발전기의 중심 간격(L_1)에 따른 와류진동 최대진폭을 나타내었다. 풍력발전기를 거더 단부에서 1.5D만큼 이격시켜서 설치했을 경우에 교축방향으로는 3D 간격으로 풍력발전기를 설치하면 와류진동이 가장 억제되었다. 그리고 2D만큼 이격시킬 경우에는 4.5D 간격으로 풍력발전기를 설치하면 가장 효과적이었다.

그림 11에서는 소형 풍력발전기 설치 여부에 따른 교량의 공기력계수를 나타내었다. 이때 풍력발전기 설치 방법은 표 1의 SD8에 해당한다. 원 단면의 양력계수를 보면 기울기가 음의 값이다. 그런데 양력계수의 기울기가 음이면 깎로핑 현상이 발생할 수 있다고 알려져 있으므로 피하는 것이 좋다 (Simiu and Miyata, 2006). 소형 풍력발전기를 설치한 후 교량의 공기력계수를 보면, 항력계수가 감소하고 양력계수 및 피칭모멘트계수의 기울기가 (-)에서 (+)로 개선되어 깎로핑에 대한 안전성을 확보한 것으로 나타났다.

이상의 실험 결과를 정리해 보면, 교량에 소형 풍력발전기를 상하부 플랩과 수평판처럼 설치하면 와류진동 억제효과가 미미한 것으로 나타났다. 하지만 페어링처럼 풍상하측에 설치하면 와류진동을 상당히 줄일 수 있으며, 풍력발전기를

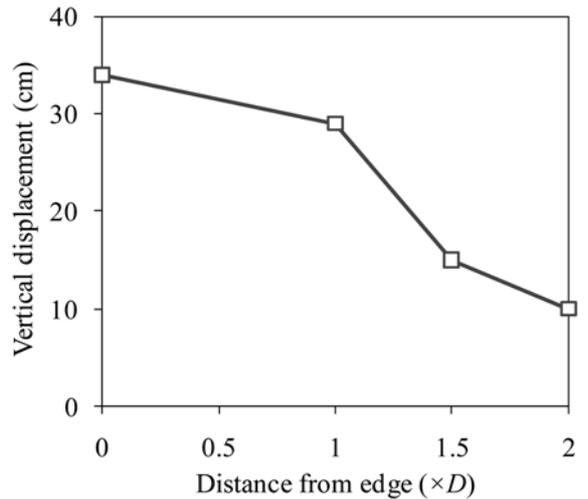


그림 9. 페어링 유사법 적용시 단부에서 떨어진 거리(W_2)에 따른 제진 효과

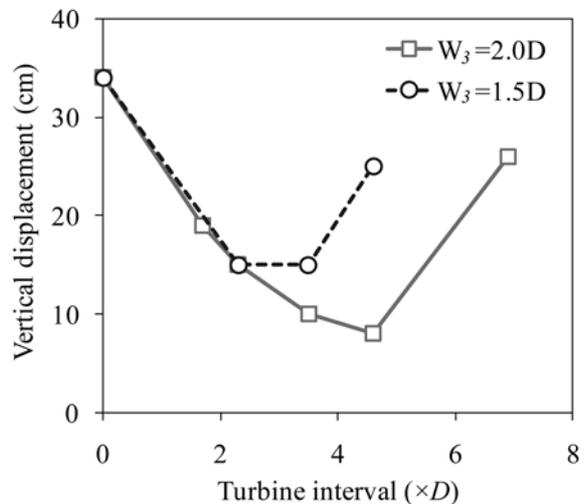
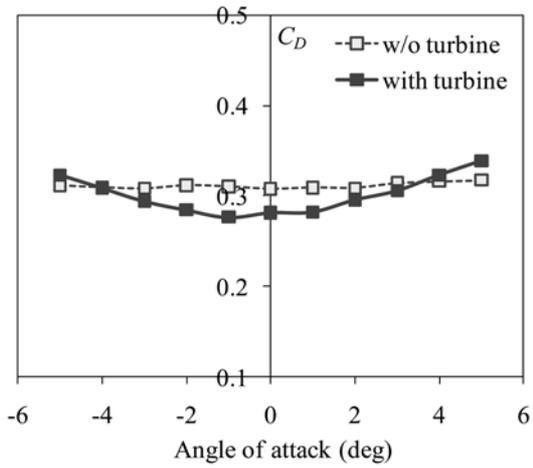
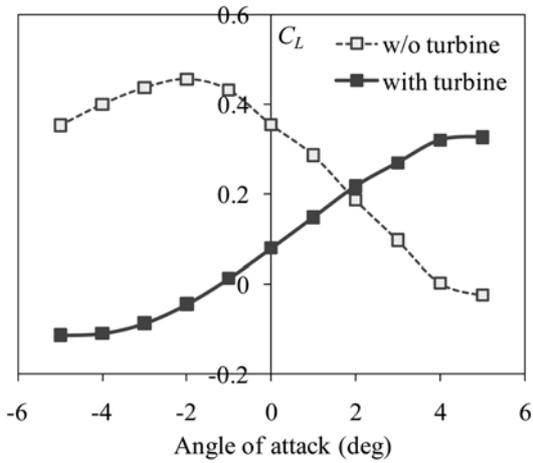


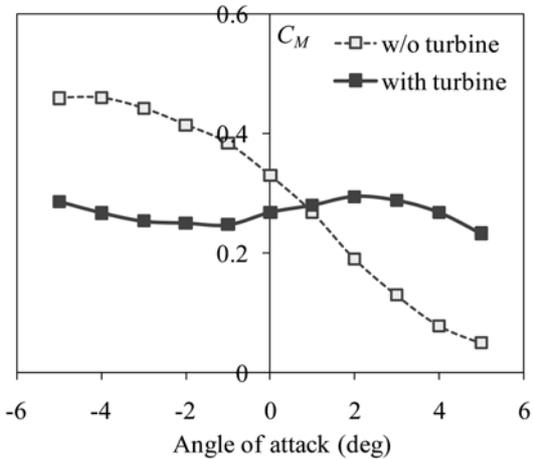
그림 10. 페어링 유사법 적용시 교축방향 이격거리(L_1)에 따른 제진 효과



(a) 항력계수



(b) 양력계수



(c) 피칭모멘트계수

그림 11. 소형풍력발전기 설치여부에 따른 교량의 공기력계수

거더 단부끝에서 1.5D 및 2D 만큼 이격시켜서 설치할 경우에 교축방향 최적 간격은 각각 3D 및 4.5D인 것으로 나타났다. 그리고 풍력발전기를 설치하면 항력계수는 낮아지고 양력계수의 기울기도 음에서 양의 값으로 바뀌어 전반적인

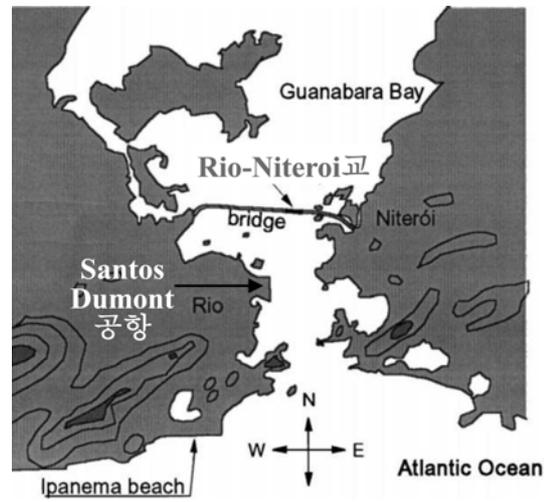


그림 12. 브라질 리오데자이네로 인근 Rio-Niterói교 위치

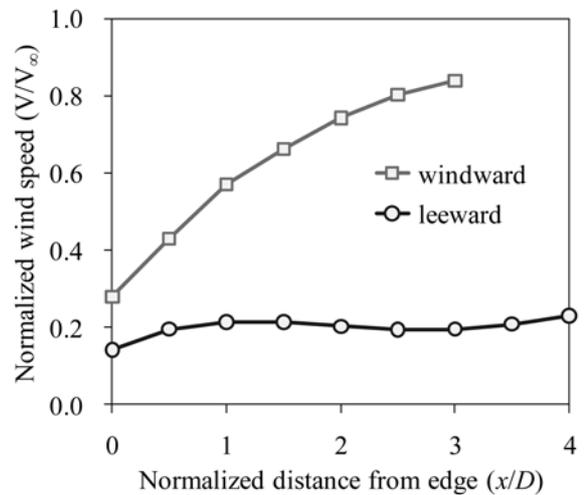


그림 13. 교량 단부로부터 이격거리에 따른 무차원풍속

내풍안정성이 향상되는 것으로 나타났다.

5. 전기에너지 생산량

Rio-Niterói교에 대한 상세한 풍속자료가 없는 관계로 인근 Santos Dumont 공항의 기상자료를 전기에너지 생산량 추정에 사용하였다. Santos Dumont 공항과 Rio-Niterói교는 직선거리로 약 5 km 떨어져 있으며 Guanabara만 입구에 위치한 관계로 지표조건은 유사하리라 판단된다(그림 12 참조). Pereira와 Lima(2008)에 의하면 Santos Dumont 공항 상공 50 m에서의 평균풍속은 6.7 m/s이고, 와이블 분포 형상함수는 1.86이다.

풍력발전기가 설치되는 거더 주위의 풍속과 실제 접근 풍속은 다르므로 풍동실험에서 단면 주위의 풍속을 측정하였다. 그림 13에서는 교량 단부로부터 이격거리에 따른 무차원풍속

표 2. 풍력발전기의 전력생산량

발전기 위치	평균풍속 (m/s)	연간 전력생산량 (MWh)	발전기 개수	연간 총전력생산량 (MWh)	가동율	이용율
풍상측	5.11	6.44	40	257.7	0.783	0.245
풍하측	1.40	0.08	40	3.2	0.067	0.003

을 나타내었다. 표 1의 SD8에 따라 풍력발전기를 설치할 경우에 풍상측과 풍하측 풍속은 접근 풍속의 약 74.3%와 20.3%가 되며, 이는 각각 5.11 m/s와 1.40 m/s가 된다. 이러한 풍속이 접근풍속과 와이블분포 형상계수는 같으므로 그림 4의 출력곡선과 함께 식 (4)에 대입하면 연간 전기생산량(AEP)을 계산할 수 있다. 그 결과는 표 2에 나타내었다.

풍상측 발전기 1기는 연간 약 6.44 MWh의 전기를 생산할 수 있으나, 풍하측은 0.08 MWh의 전기를 생산할 수 있다. 경간장 700 m인 교량에 4.5D 간격으로 풍력발전기를 배치하면 약 40개를 설치할 수 있다. 각 풍력발전기의 전기 생산량을 합치면 연간 총 260.9 MWh의 전기에너지 생산을 예측할 수 있다. 한편 풍력발전기의 가동율과 이용율을 보면, 풍상측은 각각 0.783과 0.245로 우수하나, 풍하측은 각각 0.067과 0.003으로 극히 불량하다. 풍하측은 거더에 막혀서 평균풍속이 낮은 이유로 발전량이 작다. 하지만 Rio-Niteroi 교 지역은 바닷가인 관계로 하루에 두번씩 육지와 바다쪽을 번갈아 가며 바람이 규칙적으로 발생하므로 풍상 및 풍하측 풍력발전기가 골고루 사용될 것으로 예상된다.

6. 결 론

본 연구에서는 소형 풍력발전기를 교량에 설치하여 전기 에너지 생산과 아울러 내풍안정성을 개선할 수 있는 방안을 연구하였다. 이를 위하여 기존 공기역학적 진동역제 대책과 유사하게 교량에 풍력발전기를 설치하기 위한 방법과 풍력 에너지 추정 방법을 제시하였다. 그리고 와류진동이 발생한 브라질의 Rio-Niteroi교를 대상으로 풍동실험을 실시하여 방법의 타당성을 보였다.

풍동실험 결과를 보면, 교량에 소형 풍력발전기를 상하부 플랩과 수평판처럼 설치하면 와류진동 억제효과가 미미하지만, 페어링처럼 풍상하측에 설치하면 와류진동을 거의 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 이때 풍력발전기를 단부에서 1.5D 및 2D 만큼 떨어져서 설치시 교축방향으로 최적 이격 거리는 3D 및 4.5D인 것으로 나타났다. 그리고 풍력발전기를 설치하면 항력계수는 낮아지고 양력계수의 기울기도 음에서 양의 값으로 바뀌어 전반적인 내풍안정성이 향상되는 것으로 나타났다. 한편 풍하측의 풍력발전기는 평균풍속이 낮아 발전을 못하지만, 풍상측의 풍력발전기는 상당량의 전기 에너지를 생산하는 것으로 나타났다. 이를 볼 때 Rio-Niteroi교와 같은 깊은 보에 풍력발전기를 설치하면 전기 에너지 생산과 더불어 내풍안정성도 향상시키는 두가지 목적을 동시에 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 초장대교량 사업단 제1핵심과제를 통하여 지원

된 국토해양부 건설기술혁신사업 (08기술혁신E01)에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- 日本土木學會 (2003) 橋梁の耐風設計 -基準と最近の進歩-.
- Barelli, M., White, J., and Billington, D.P. (2006) History and aesthetics of the bronx-whitestone bridge, *J. of Bridge Engineering*, Vol. 11, No. 2.
- Battista, R., Pfeil, M., Velihovetchi, N., and Maciel, A. (2008) Multiple controllers of wind-induced oscillations of a long span bridge, *17th Congress of IABSE*, Chicago.
- Battista, R. and Pfeil, M. (2000) Reduction of vortex-induced oscillations of Rio-Niteroi bridge by dynamic control devices, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 84, pp. 273-288.
- BBC, 2008. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7340528.stm>.
- Chang, T.J. Wu, Y.T., Hsu, H.Y., Chu, C.R., and Liao, C.M. (2003) Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan, *Renewable Energy*, Vol. 28.
- El-Gammal, M., Hangan, H., and King, P. (2007) Control of vortex shedding-induced effects in a sectional bridge model by spanwise perturbation method, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 95.
- Fujino, Y. and Yoshida, Y. (2002) Wind-induced vibration and control of Trans-Tokyo Bay Crossing Bridge, *J. of Structural Engineering*, Vol. 128, No. 8.
- Hay, J.S. (1981) The wind induced response of the Erskine Bridge, *Conference at the Institute of Civil Engineers*, Vol. 6.
- IEC (2005) *Wind turbines. Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines*, IEC 61400-12-1, International Electrotechnical Commission.
- Kwon, S.D. (2010) Uncertainty analysis of wind energy potential assessment, *Applied Energy*, Vol. 87, No. 3.
- Larsen, A., Esdahl, S., Andersen, J.E., and Vejrum, T. (2000) Storebaelt suspension bridge - vortex shedding excitation and mitigation by guide vanes, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 88.
- Manwell, J.F., McGowan, J.G., and Rogers, A.L. (2002) *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, Wiley.
- Owen, J.S., Vann, A.M., Davies, J.P., and Blakeborough, A. (1996) The prototype testing of Kessock Bridge: response to vortex shedding, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 60.
- Pereira, E.B. and Lima, J.H.G. (2008) *Solar and Wind Energy Resource Assessment in BRAZIL*, National Institute for Space Research - INPE.
- Simiu, E. and Miyata, T. (2006) *Design of Buildings and Bridges for Wind*, Wiley.
- Travere Industries (2009) <http://www.travere-industries.com/>.
- Wardlaw, R.L. (1992) The improvement of aerodynamic performance, *Aerodynamic of Large Bridges*, Balkema.

(접수일: 2009.10.1/심사일: 2009.11.9/심사완료일: 2009.11.9)