

## 단기 풍관측에 의한 교량현장 기본풍속 추정

이성로\* · 김상우\*\*

Lee, Seong-Lo\*, Kim, Sang-Woo\*\*

### Estimation of Basic Wind Speed at Bridge Construction Site Based on Short-term Measurements

#### ABSTRACT

In this paper, a study on the prediction method of basic wind speed at the construction site of long-span bridge using short-term measurements was conducted. To determine the basic wind speed in the wind resistant design for the long-span bridge away from the weather station, statistical analysis of long-term data at site is required. Wind observation mast was installed at site, and short-term measurements were gathered and the correlation analysis between the site and the station was done using regression analysis and MCP(Measure-Correlate-Predict). The long-term wind data of the site was obtained from correlation formula after topographical revision of long-term data of the station. And basic wind speed could be estimated by extreme probability distribution analysis. The research results show that the wind speed by regression analysis is predicted lower than by MCP and after this study a series of correlation analyses at several sites will show clearly the difference two methods. And also a quality control of long-term wind data is very important in estimation of wind speed.

**Key words** : Basic wind speed, Short-term measurements, Correlation, Wind observation mast

#### 초록

본 논문에서는 단기 관측자료를 활용하여 장대교량 현장의 기본풍속을 추정하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 기상관측소로부터 거리가 먼 장대교량의 내풍설계시 현장의 기본 풍속을 추정하기 위해 현장의 장기 풍속자료를 통계처리하는 것이 필요하다. 현장에 풍관측탑을 설치하고 단기간의 풍관측 자료를 확보하였고 선형회귀분석 및 MCP 방법을 이용하여 인근 기상관측소와의 상관관계를 분석하였다. 기상관측소의 장기 풍속자료를 지형보정을 한 후 상관관계식에 의해 현장의 장기 풍속자료를 얻었고 풍속자료의 극치 확률분포 분석에 의해 기본풍속 산정을 할 수 있었다. 연구결과에서는 선형회귀분석의 방법이 MCP 방법에 비해 풍속을 낮게 추정하고 있으며, 향후 여러 현장에서 일련의 상관관계 분석을 수행한다면 종합적으로 두 방법에 의한 기본풍속 산정의 차이를 보다 명확히 보여줄 것이다. 또한, 장기자료의 질 관리가 풍속추정에 매우 중요하다는 것을 보여주고 있다.

**검색어** : 기본풍속, 단기관측자료, 상관관계, 풍관측탑

## 1. 서론

### 1.1 연구 필요성 및 목적

장대교량의 내풍설계시 기본이 되는 기본풍속을 추정하고 설계위치에서의 정확한 설계풍속을 예측하여 설계풍하중 산정 및 내풍안정성검증을 하는 것은 매우 중요한 과정이다. 장대교량은 풍하중에 의한 영향이 다른 하중보다 상대적으로 크므로 풍공학 측면에서는 장대교량이

\* 정회원 · 교신저자 · 목포대학교 토목공학과 (Corresponding Author · Mokpo National University · silee@mokpo.ac.kr)

\*\* 목포대학교 대학원 석사수료 (swkim@mokpo.ac.kr)

Received April 5 2012, Revised August 2 2012, Accepted April 26 2013

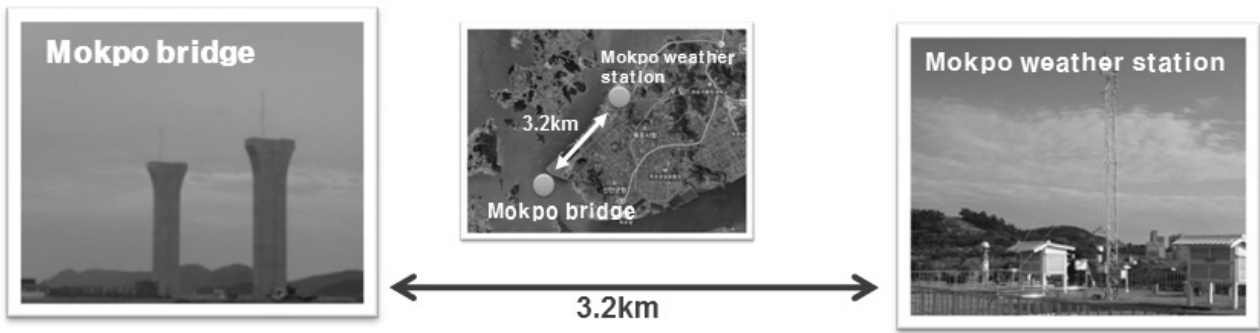


Fig. 1. Comparisons of Mokpo bridge's observation mast and Mokpo meteorological station

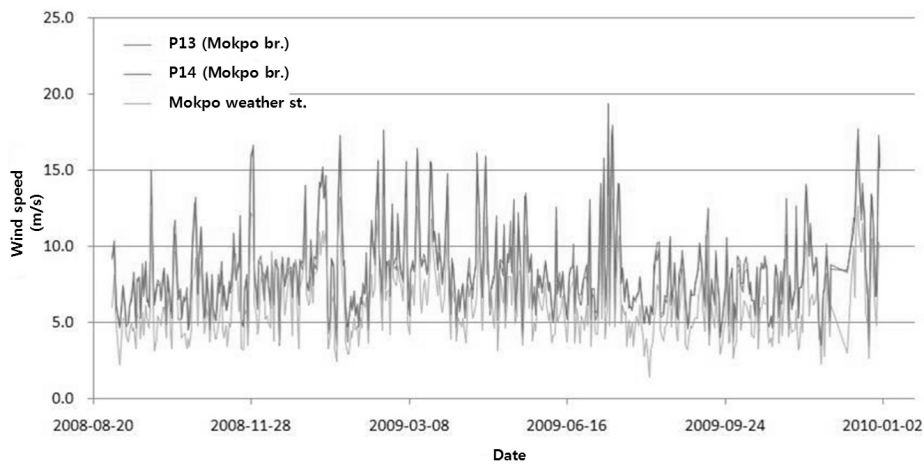


Fig. 2. Time series of wind observations at the construction site of Mokpo bridge

설계와 시공에서 불리하지만, 장대교량 건설이 늘어나는 최근의 동향을 고려할 때 정확한 풍하중의 산정과 내풍안정성 확보가 더욱 더 강조될 필요가 있다.

일반적으로 풍속은 지역 및 지형특성에 의해 영향을 크게 받기

때문에 내풍설계의 기본이 되는 기상관측 자료가 필요하다. 그러나 일반적으로 기상관측소는 교량 현장과 떨어져 있는 경우가 대부분 이고, 교량 현장은 관측소와는 또 다른 국부적 풍환경을 형성할 수 있으므로 장대교량 현장은 별도의 풍환경 평가가 필요하다.

Table 1. Determination procedure of wind velocity using field observations

Main Procedure	Contents	Output
installation of observation mast at site	observing wind speed, wind direction and attack angle	wind data at site
short term observation data	analyzing wind characteristics at site	main wind direction, mean wind speed, attack angle, surface roughness, turbulence intensity, turbulence spectrum
long term data of weather station	analyzing observational condition (location, slope, height, roughness)	correction of wind data of weather station
correlation analysis	regression analysis	reduction factor, long term data of site
statistical analysis	estimating parameter, testing validity	basic wind speed at site

따라서 도로교설계기준(2005)에서는 기본풍속을 대상지역 인근의 기상관측소의 장기풍속기록(태풍 또는 계절풍)과 지역적 위치를 동시에 고려하여 극치분포로부터 추정하거나 태풍자료의 시뮬레이션 등의 합리적인 방법으로 추정하도록 정하고 있으며, 설계기준풍속( $V_d$ )은 대상 지역의 기본 풍속과 교량의 고도, 주변의 지형과 환경 등을 고려하여 합리적인 방법으로 결정한다고 정하고 있다. 케이블강교량설계지침(2006)에 따르면, 교량의 건설현장의 풍환경과 각종 자료를 수집하여 기본풍속을 결정함으로써 내풍설계가 시작된다. 기본풍속은 각 지역별 기상관측소의 장기풍속기록을 통계 처리 하여 구한다. 이때 기상관측소 주변 지형과 고도, 풍속계의 설치 높이 등을 합리적인 방법으로 보정하여야 한다. 기본 풍속은 그 인근 지역을 통과한 태풍 기록과 태풍 모델을 바탕으로 시뮬레이션 기법을 사용하여 구할 수도 있다.

시간장 1,000 m 정도 이상의 현수교, 500m 정도 이상의 사장교를 대상으로 하고 있는 본주사국연락교 내풍설계기준(2001)은 기본풍속의 결정에 첫째, 가교지점 관측소와 기준기상관측소 관측기록의 상관으로부터 추정, 둘째 가교지점관측소의 자료에 Gringoten 방법을 사용한 직접적인 추정, 셋째 기준기상관측소의 재현기대치와 지형요소의 회귀분석에 의한 추정 등의 세가지 방법을 제시하고 있다. 하지만, 가교지점의 현지관측 기록이 다년에 걸쳐 측정되어 있거나 혹은, 정밀한 지형모형 풍동실험에 의해 기상관측소의 풍속과 가교지점의 풍속의 신뢰할 만한 상관관계를 얻을 경우가 아니면 정밀한 기대치의 추정은 불가능하다.

본 논문에서는 장대교량 현장의 기본풍속을 결정하기 위해 교량 현장에 설치된 관측탑의 단기 풍관측자료를 활용하는 방법을 연구하고 풍속 산정의 신뢰도를 향상시키는 데 도움이 되도록 하고자 한다.

## 1.2 단기관측을 통한 현장 풍속 추정

구조물의 설계풍속을 산정하기 위하여 설계기준의 지역별 기본풍속을 사용하거나, 인근 기상관측소의 연최대풍속을 극치분포 확률모형에 대입하여 재현주기별 풍속을 추정하기도 하고, 인근 지역을 통과한 태풍기록과 태풍모델을 바탕으로 시뮬레이션 기법을 사용하여 구하기도 한다. 설계풍속을 추정하는 가장 좋은 방법은 교량이 건설되는 현장에 관측탑을 설치하고 장기간 풍속을 측정하는 방법이다. 하지만 설계풍속을 추정할 만큼 현실적으로 장기간 풍속을 관측하기는 어려우므로, 단기간 관측된 풍속 자료를 바탕으로 장기 풍속을 추정하는 것이 합리적이다.

교량 현장의 기본 풍속을 추정하기 위해 가설 예정지에 풍관측탑을 설치하고 관측을 하는 경우에는 단기 풍관측 자료 확보와 더불어 인근 기상관측소의 장기 풍관측 자료 확보, 상관관계 분석, 극치 확률분포 분석이 필요하다. 각각의 과정에 대한 필요 내용을 Table

1에 정리하였다.

## 2. 단기 풍관측자료 확보

### 2.1 풍관측탑 구성

2008년도에 목포대교 가설현장의 바람 특성을 파악하기 위하여 현장 내 지상 40m 높이 교각 상부에 10m 높이의 관측탑 위에 초음파 풍속계를 설치하였다(Lee et al., 2009).

다음 Figure 1은 풍관측탑 설치 사진 및 목포기상대와 교량 가설 현장의 거리관계를 나타낸 것이다.

바람자료의 관측은 4Hz의 데이터를 관측하여 1분 평균풍속을 데이터로기에 저장하도록 하였고 10개의 1분 평균풍속을 평균하여 10분 평균풍속으로 사용하였다. 그리고 10m/s이상의 풍속이 관측될 경우 바람의 동적특성을 분석하기 위해 32Hz 자료를 따로 저장하도록 하였다.

### 2.2 현장 관측자료의 분석

현장관측은 2008년 9월 1일부터 2009년 12월 31일까지 진행하여 Figure 2에서 시계열을 나타냈고, 바람 특성의 분석에 의해 주풍향, 난류강도, 난류스펙트럼을 얻을 수 있었다. 2008년 9월 1일부터 2009년 8월 31일까지의 1년간의 관측자료를 16방위를 사용하여 바람장미를 나타내었으며(Figure 3), Figure에 나타난 것과 같이 큰 원에 4%씩 증가하도록 하여 쉽게 풍속의 빈도를 알 수 있도록 하였다. 무풍빈도(%)는 0~0.2m/s로 정의하여 공백부분에 표시하도록 하였다. 관측자료에 의하면 현장의 주풍향은 P13번 교각의 경우 N방향, P14번 교각의 경우 NNW 방향으로 나타났다.

Table 2는 10m/s 이상의 풍속에서 관측된 32Hz의 풍속데이터에 대한 난류강도, 난류길이스케일에 대해 정리하였다. Table에서 5월, 6월, 8월은 고풍속데이터가 관측되지 않아 난류스펙트럼을 얻을 수 없었다. 고풍속자료의 동적 특성은 10분간 관측된 19,200개의 자료를 처리하여 얻었다. 난류길이는  $L_w$ 가 81~611m,  $L_w$ 가 16~58m까지의 편차가 발생하고 있으며 기존의 연구에서와 같이 변화의 폭이 크게 나타나고 있다(한국풍공학회, 2010).

## 3. 기상관측소의 기본풍속

### 3.1 기상관측소의 자료 수집 및 분석

목포기상대는 1904년 전남 신안군 하의면 옥도리 103번지에서 창설되어 동년 3월 25일 정규기상관측업무를 시작하였다. 하의면 옥도리에서 1906년 4월 대의동 2번지 목포문화원 구내를 거쳐 1906년 8월 노적봉 옆 현 시민중각자리로 옮겨와 1997년 12월 연산동으로 이전하기 전까지 91년 동안 기상업무를 관장하였다.

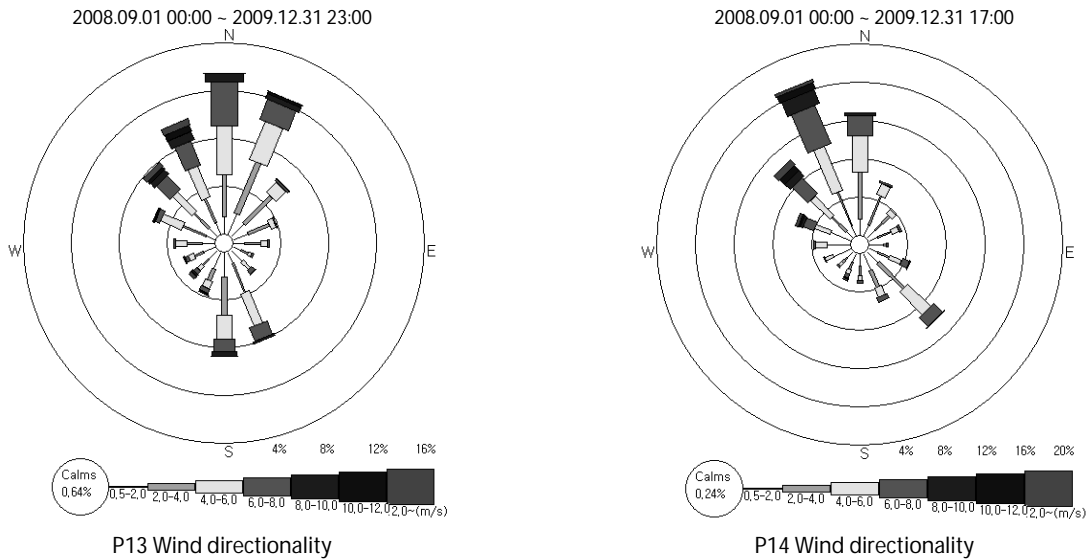


Fig. 3. Wind directionality at bridge site

Table 2. Dynamic characteristics of wind data(over 10m/s) at bridge site

Observation date	Wind direction	Mean wind speed (m/s)		Turbulence intensity (%)		Integral scales of turbulence (m)	
		$U$	$W$	$I_u$	$I_w$	$L_u$	$L_w$
08.11.29	SEE	17.01	-0.23	9.08	6.26	128.10	38.88
08.12.25	SSE	13.51	0.092	17.96	8.07	259.73	30.15
09.01.23	SE	15.51	-0.80	10.69	7.22	101.77	25.33
09.02.20	SSE	16.12	0.068	12.45	6.43	550.77	54.52
09.03.13	SSE	13.84	0.022	16.30	8.37	429.84	25.78
09.04.25	SE	14.63	-0.023	12.65	6.03	611.03	62.47
09.07.12	SW	18.52	-0.22	14.59	9.38	81.14	16.03
09.09.12	SSE	11.77	0.20	11.77	6.64	114.88	28.56
09.10.19	SE	11.25	0.065	12.36	6.26	177.58	58.09

아래 Table 3은 목포기상대의 연혁을 보여주고 있다.

목포기상대의 장기 풍속자료는 총 103년(1907~2009)에 걸쳐 세 번의 관측소 이전으로 세그룹의 관측자료를 기초로 작성되었으나, 1964년 이전 기상대의 관측위치나 제원이 불분명하여 자료의 신뢰성이 크다고 볼 수 없으므로 논문에서는 103년의 자료를 사용한 경우와 1964년 이후의 자료만 고려한 46년의 자료를 사용한 경우를 비교하였다.

목포기상대의 자료를 이용하여 목포대교 현장의 기본풍속을 추정하기 위해서는 몇가지 보정이 필요하다. 먼저 기상대의 위치가 과거나 현재에 구릉지형에 위치하고 있으므로 평지보다 증가된 풍속이 측정된다. 또한 풍속계 고도가 기상대의 이전과 함께 변하였으므로 이를 이용하여 지상 10m에 대한 값으로 보정하여야 한다.

먼저 구릉지의 정상에 위치한 목포기상대의 관측풍속을 보정하

Table 3. History of Mokpo meteorological station

observation period	observation place	roughness	observation height from ground (m)
1904.03 ~ 1906.04	okdo haeui-myon sinan-gun jeonnam	II	-
1906.05 ~ 1906.07	dae-dong mokpo	II	5.8
1906.08 ~ 1929.10	dae-dong mokpo	II	5.8
1929.11 ~ 1964.03	dae-dong mokpo	II	5.8
1964.04 ~ 1997.12	dae-dong mokpo	III	15.8
1998.01 ~ present	yonsan-dong mokpo	III	15.5

기 위하여 목포지역 수치지도로부터 지형정보를 파악하고 지형의 긴쪽과 짧은 쪽을 평균하여 유로코드(2001)에 의한 보정을 실시하

였다(Figure 4). Table 4는 기상관측소 위치별 구릉지 보정에 사용된 계수들이다. 평지풍속(평균) = 구릉지풍속 /  $c_0$ 에 의해 구릉지 풍속은 보정된다.

Table에서 구릉지 보정계수  $c_0 = 1 + 2 \times s \times \phi$  이며,  $\phi = \frac{H}{L_u}$   $L_e = L_u$  (shallow,  $0.05 < \phi < 0.3$ )이다.

고도에 따른 풍속보정은 일반적으로 사용되고 있는 식 (1)와 같이 지수법칙(Power law)을 사용하였으며, 기준경고도( $z_G$ )에서의 풍속은 지표조도구분에 상관없이 동일한 값을 가지는 것으로 가정하였다.

$$U(z_g, z_0) = \left( \frac{z_g}{\delta(z_0)} \right)^{\alpha(z_0)} \left( \frac{\delta(z_{01})}{z_{g1}} \right)^{\alpha(z_{01})} U(z_{g1}, z_{01}) \quad (1)$$

Figure 5에서는 목포기상대의 연최대평균풍속 및 구릉지 효과를 고려하여 개활지(지표조도구분II)에서의 지상 10m로 환산한 풍속을 보여주고 있다.

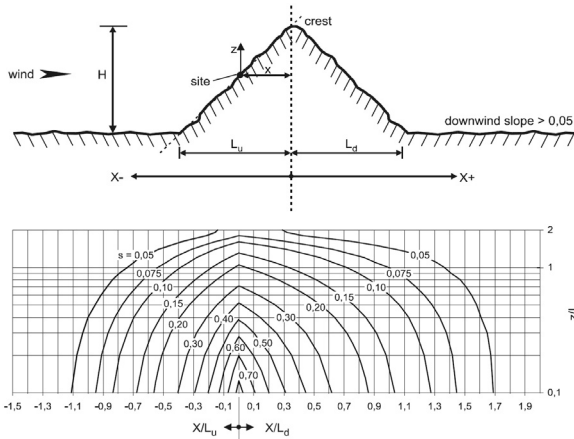


Fig. 4. Hill correction of Eurocode (2001)

Table 4. Hill correction coefficients for each weather station location

parameter	present weather station (1998-2009)	old weather station (1964-1997)	old weather station (1907-1964)
	group 3	group 2	group 1
$L_u = L_d$	86.9	89.8	89.8
X	-31.5	-15.9	-38.8
H	19.3	18	18
z	15.5	15.8	5.8
$\phi$	0.222	0.20	0.20
$L_e$	86.9	89.8	89.8
s	0.297	0.47	0.295
$c_0$	1.132	1.188	1.118

### 3.2 기본풍속 산정

기본풍속을 추정하기 위하여 결합분포확률을 이용하여 바람과 관련한 통계적 데이터를 처리하고 분포모델의 검사 및 변수추정을 수행하였다. 이를 위하여, 동일한 장소에서 여러 방향에 대한 평균풍속은 동일한 분포모델에 따르며 특정장소의 전 방향 풍속기록의 모든 표본에 적합한 것으로 가정하였다. 또한, 동일한 장소의 여러 방향에 대한 최적 모델의 평균풍속은 서로 독립적이며, 해당 방향에 대한 풍속기록의 표본에 의해서만 최적으로 추정될 수 있는 것으로 가정하였다.

바람과 관련한 통계적 데이터들은 대부분 극한의 속도기록이며, 주어진 통계주기 안에서 최대속도를 결정하기 위한 것이므로 Gumbel 등에 의해 제안된 극한분포모델을 사용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 해당지역의 장기간의 연최대풍속 자료를 Gumbel 분포에 적용하여 분포특성을 파악하고 재현주기에 따른 극한 풍속을 산정하였다.

#### 3.2.1 Gumbel 분포모델

Gumbel의 누적분포함수는 식 (2)와 같다. 여기서  $F_X(x)$ 는 초과확률을 나타낸다.

$$F_X(x) = \exp(-e^{-\alpha(x-u)}) \quad (2)$$

공사기간 N에 대하여 초과확률  $F_{X_N}(x)$ 은 다음 식 (3)과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$F_{X_N}(x) = [F_X(x)]^N = \exp(-Ne^{-\alpha(x-u)}) = \exp(-e^{-\alpha(x-u) - \frac{\ln N}{\alpha}}) \quad (3)$$

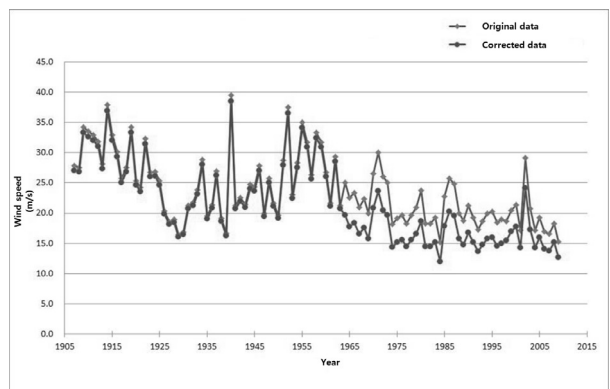


Fig. 5. Corrections of 10-minute largest yearly mean wind speed at Mokpo weather station

따라서 비초과확률, (1-p)에 대해서는 식 (4)와 같이 정리할 수 있으며

$$F_{X_V}(x) = 1 - p = \exp(-e^{-\alpha(x-u-\frac{\ln N}{\alpha})}) \quad (4)$$

$$\ln(1-p) = -e^{-\alpha(x-u-\frac{\ln N}{\alpha})}$$

이때 x에 관하여 식을 정리하면 재현주기를 고려한 극한 풍속을 산정할 수 있으며 이는 식 (5)와 같다.

$$x = u + \frac{1}{\alpha} \ln(-\frac{N}{\ln(1-p)}) \quad (5)$$

- 여기서, N : 내용년수
- p : 초과확률
- u, a : 확률분포모델 모수
- x : 내용년수와 초과확률을 고려한 설계값

식 (5)에서 α와 u는 각각의 분포모델이 놓이는 위치 및 스케일에 대한 상수이며, 모멘트 방법이나 ML 방법, OS 방법 등에 의해 추정할 수 있다.

분포모델의 검사는 풍속기록의 데이터가 확률분포모델에 적합한지를 검사하기 위해 수행된다. 검사에는 주로  $x^2$  검사, K-S 검사, PPCC 등이 있다. 목포기상대의 장기풍속자료를 통해 고도 및 지형보정을 실시하여 장기풍속을 추정하였으며 확률분포모델의 적합도를 판단하기 위하여 앞에서 언급한 세가지 방법을 이용하였으며 세가지 모두에 대해 적합성을 만족하는 것으로 나타났다. 확률분포 해석에서 모멘트 방법에 의한 모수추정과 ML 방법에 의한 모수추정시 적합도는 1907년 이후의 전체 자료를 사용한 경우 PPCC값이 0.96으로 같게 평가되었으며, 1964년 이후의 자료만 사용한 경우에도 0.96으로 같게 평가되었다.

### 3.2.2 재현주기를 고려한 극한 풍속의 추정

Table 5는 총 103년의 장기 풍속자료와 1964년 이후의 자료만 고려한 46년 장기 풍속자료를 기준으로 풍속을 추정한 결과이다. 여기에서는 관측소의 이전에 따른 위치변화의 영향을 고려하지 않았으며, 구릉지 보정과 고도 보정을 하였다.

공용중에 검토년수 50년, 비초과확률 60%를 고려하였을 때, 1907년 이후의 전체 자료를 사용한 경우 Gumbel 분포모델에서 재현기간 100년에 해당하는 기본풍속(10분 평균, 지상 10m, 지표 조도 II)은 41.8m/s이나, 1964년 이후의 풍속자료만 이용하였을 경우에는 재현기간 100년에 해당하는 기본풍속이 24.6m/s에 지나지 않아 풍속자료의 사용에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 이러한

**Table 5.** Return period and exceedance probability of basic wind speed

service year	non-exceedance probability (%)	return period	basic wind speed(m/s)	period of data
100	60	200	45.3	1907~2009
50	60	100	41.8	
100	60	200	26.0	1964~2009
50	60	100	24.6	

차이는 장기 관측자료가 많을수록 모집단과의 확률적 해석값이 유사할 수 있으나, 옛 자료의 질에 대한 신뢰성이 결과에 큰 영향을 미칠 수 있음을 보여주는 것이다. Kwon et al.(2008)은 태풍시물레이션에 의해 28.3m/s로 추정한 바 있다.

케이블강교량설계지침(2006)에서는 기본풍속 산정시에 각 해당지역별 기상관측소의 장기풍속자료를 통계처리하여 활용하도록 제시하고 있으며, 풍속자료가 가용치 못할 경우에는 태풍시물레이션 기법을 사용하여 구할 수 있다고 명시하고 있다. 다만, 도로교설계기준(2005)에서는 풍속자료가 가용치 못한 경우에 제시된 풍속을 사용하도록 하고 있다.

## 4. 풍속의 상관관계 분석

본 연구에서는 현장의 기본풍속을 도출하기 위해 기상대 10분 풍속과 관측탑 10분 풍속의 상관성을 분석한 후, 기상대 구릉지 조건과 고도에 대해 보정된 자료로부터 현장의 장기풍속자료를 생성하였다. 상관성 분석은 기상대 단기 관측 풍속과 관측탑 단기 관측 풍속을 회귀분석하는 방법과 각각의 단기 관측 풍속을 구릉지와 고도 보정후 회귀분석하는 방법을 고려할 수 있다. 그리고 생성된 장기풍속 자료와 극치확률분포(Gumbel)를 이용하여 현장 기본풍속을 산정하였다.

### 4.1 선형 회귀분석

교량 현장이 기상 관측소와 어느 정도 떨어져 있는 경우, 기상대의 풍속과 교량현장의 풍속 사이에는 연관성이 있다고 가정할 수 있으며 두 값을 한 쌍의 변수로 하여 회귀분석에 의해 선형 결합관계가 큰지 파악할 수 있다.

단기간 측정된 풍속을 사용하여 장기 풍속을 추정하기 위한 방법으로 MCP(Measure-Correlate-Predict) 방법이 있다(Manwell et al., 2002; Kwon et al., 2009). MCP 방법은 현장에서 측정된 단기간 풍속과 인근 기준점의 풍속을 비교하여 현장의 장기 풍속을 추정하는 방법이다. Rogers et al.(2005)이 제안한 분산비

방법에서는 풍속의 표준편차비를 선형관계식의 기울기로 이용하였다(식 (6)).

$$V_{target} = \left(\frac{\sigma_V}{\sigma_U}\right)U_{ref} + \bar{V} - \left(\frac{\sigma_V}{\sigma_U}\right)\bar{U} \quad (6)$$

여기서,  $U$ 는 기준점(기상대)의 단기 풍속,  $V$ 는 현장의 단기 풍속,  $U_{ref}$ 는 기준점(기상대)의 장기 풍속,  $V_{target}$ 은 현장의 장기 풍속 추정치,  $(\bar{\quad})$ 는 평균,  $\sigma$ 는 풍속의 표준편차이다.

분산비 방법은 선형회귀식  $V_{target} = \alpha + \beta U_{ref}$ 에서 기준점과 목표점의 단기풍속 상관계수  $\rho$ 에 대해 기울기를  $\beta = \rho \frac{S_V}{S_U}$  대신  $\beta = \frac{S_V}{S_U}$ 를 사용하였고, 절편을  $\alpha = \bar{V} - \rho \frac{\sigma_V}{\sigma_U}(\bar{U})$  대신  $\alpha = \bar{V} - \frac{\sigma_V}{\sigma_U}(\bar{U})$ 를 사용하였다. 그러나 이 모델은 목표점의 풍속과 기준점의 풍속이 정확히 선형관계를 가진다는 가정이 있어야 하는데, 표본의 수가 적을 경우 강한 선형관계의 가정이 성립하기 어려우며, Rogers et al.(2005)은 6000~7000hours(8~9.5months) 이상의 표본이 있으면 장기풍속의 표준편차가 최소로 된다고 보았다. 그러나 자료의 수에 따른 상관계수의 변화가 예상되는데 이에 대한 고려가 되지 않는다는 문제가 있다.

한편, 기상대의 풍속과 교량현장의 풍속 사이의 연관성을 상관계수와 표준편차를 고려한 선형회귀분석으로 접근하면, 결합정규분포를 가지는 두 변수  $U$ 와  $V$ 의 조건부 평균과 표준편차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{target} = \bar{V} + \rho\left(\frac{\sigma_V}{\sigma_U}\right)[U_{ref} - \bar{U}] \quad (7)$$

$$Var[V_{target}] = \sigma_V^2(1 - \rho^2) \quad (8)$$

그리고, 결정계수  $r^2 = 1 - \frac{\sigma_{V|u}^2}{\sigma_V^2}$ 로 나타낼 수 있으며  $0 \leq r^2 \leq 1$ 의 값을 갖게 된다.

여기서,  $\sigma_{V|u}$ 는 추정치의 분산정도를 나타내는 조건부 표준편차이며,  $\sigma_V$ 는 현장 단기풍속자료의 표준편차다. 추정치의 조건부 표준편차가 0일 때 결정계수는 1의 값을 갖는다. 자료의 수가 많으면  $r$ 은 근사적으로 상관계수와 같다.

이상에서 MCP 방법은 결합정규분포를 가지는 두 지점의 풍속이 상관계수가 1일 때의 관계식으로 볼 수 있다. 그러나 두 지점의 풍속에 대한 상관성이 1인 관계식을 도출하기는 현실적으로 어려우며 따라서 상관계수와 표준편차를 고려한 선형회귀분석에 의한 관계식이 합리적이라 판단된다.

### 4.2 교량현장 장기 풍속자료 생성

본 연구에서 단기간 측정된 풍속을 사용하여 장기 풍속을 추정하기 위해 2008년 9월 1일부터 2009년 8월 31일까지 총 12개월의 풍속 자료를 사용하였다.

풍향별 고풍속자료가 충분하지 못하여 풍향을 반영하지 않고 MCP 방법을 적용한 결과와 목포기상대와 목포대교 현장의 실측값만을 통해서 1:1 상관관계분석만을 통한 풍속 관계는 Figure 6에 나타내었다(App. 1 참조).

### 4.3 교량현장 기본풍속

이상에서 목포대교현장의 단기풍속 실측값을 목포기상대 실측값과 1:1 상관분석 및 MCP분석에 의해 관계식을 계산하고 목포기상대 풍속자료를 관계식에 대입하여 현장의 장기 풍속을 추정하였다. 그리고 현장의 장기풍속자료를 Gumbel 확률 모델에 대입하여

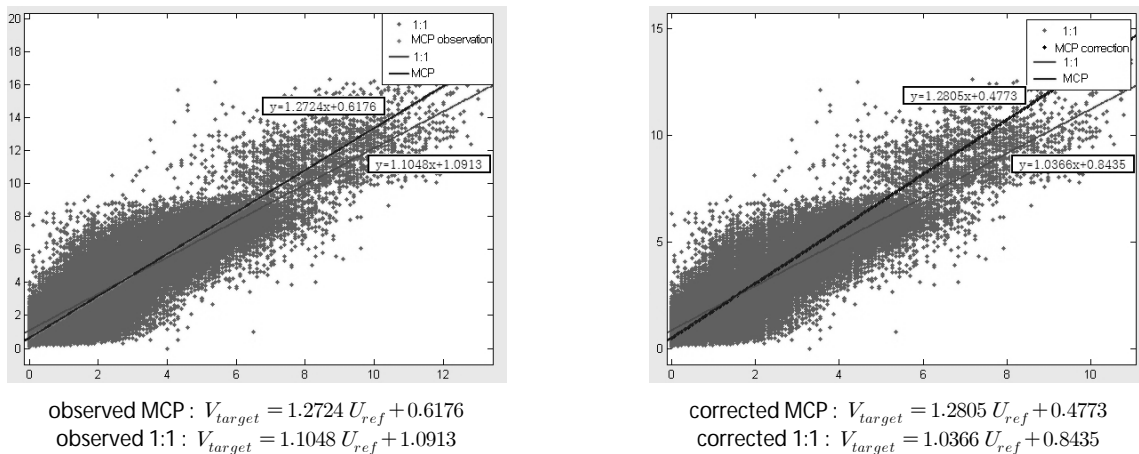


Fig. 6. Correlation analysis between reference and target site

Table 6. Estimation of basic wind speed at bridge construction site

division	service year	non-exceedance probability	return period	basic wind speed (P13)	period of data
linear regression analysis	100	60%	200	47.8 (m/s)	1907~2009
	50	60%	100	44.1 (m/s)	
MCP	100	60%	200	58.4 (m/s)	
	50	60%	100	53.9 (m/s)	
linear regression analysis	100	60%	200	27.8 (m/s)	1964~2009
	50	60%	100	26.3 (m/s)	
MCP	100	60%	200	33.7 (m/s)	
	50	60%	100	31.9 (m/s)	

재현주기에 따른 풍속을 추정된 결과는 Table 6에 나타난 값과 같다. Table 6에서 교량현장의 재현주기 100년에 해당되는 기본풍속은 1907년 이후의 전체 자료를 사용한 경우 44.1m/s(선형회귀분석), 53.9m/s(MCP)로 나타났지만, 1964년 이후의 풍속자료만 이용하였을 경우에는 26.3m/s(선형회귀분석), 31.9m/s(MCP)로 나타났다. Table 5에서 기상대의 장기 풍속자료에 의한 풍속이 각각 41.8m/s, 24.6m/s인 것과 비교하면 해안지역에 인접한 교량현장에서의 풍속이 보다 크게 추정하고 있음을 알 수 있다. 그리고 3.2.2절에서 언급한 비와 같이 풍속자료의 기간에 따라 풍속 추정에 많은 차이가 있음을 보여주고 있다. 또한 상관관계분석 방법에 의해서도 차이가 나고 있음을 알 수 있는데, 바람과 같은 불규칙적인 자료에서 지형적 영향을 고려하면 두 지점에서 관측된 바람자료의 상관관계수가 1인 경우가 거의 없기 때문에 상관계수와 표준편차를 고려한 선형회귀분석 방법에 의한 풍속 추정을 제안하고자 한다. 그리고, MCP 방법이 선형회귀분석에 의한 경우보다 결과 값을 높게 추정하는데, 이는 MCP 방법에서 상관계수(<1)를 고려하지 않고 있어 Figure 6에서와 같이 상관관계식의 기울기가 선형회귀분석 방법에 비해 크기 때문인 것으로 생각된다.

본 연구는 단일 지역의 경우에 국한되어 있으므로 일반적인 경향을 확인하기 위해 지형적 여건을 고려할 수 있는 여러 현장에서 일련의 상관관계 분석을 수행한다면 종합적으로 두 방법에 의한 기본풍속 산정의 차이를 보다 명확히 규명할 수 있을 것이다.

### 5. 결론

교량현장의 장기 관측 자료를 확보하기 위해서는 현장의 바람 관측탑 단기 운영과 주변 기상대의 상관관계 분석에 의한 기상대 장기 관측 자료의 활용이 효과적이다. 또한, 현장의 관측탑 운영에서 얻을 수 있는 주풍향, 영각, 난류강도, 지표조도계수, 난류스펙트럼으로부터 교량의 내풍 안정성을 검토할 수 있다.

본 연구의 대상인 목포지역의 경우 관측소 이전으로 관측위치에

따라 세그먼트의 관측 자료가 존재하고 현재의 목포기상대 풍속자료(그림3)가 비교적 짧은 기간이라 단일지역의 장기간 관측 자료에 비해 해석결과의 신뢰성을 높이기 어려운 한계가 있다. 1997년 이전의 자료는 동일 관측지역이 아니라 회귀분석을 바로 적용하는데 어려움이 있어 기상관측소의 위치에 따른 구릉지 영향을 적절히 보정하여 변동성을 줄이고자 하였다.

장기자료에 의한 재현기간 100년의 기본풍속은 풍속자료의 기간에 따라 1907년 이후의 전체 자료를 사용한 경우 41.8m/s이나, 1964년 이후의 풍속자료만 이용하였을 경우에는 24.6m/s으로 많은 차이가 난다. 장기 자료의 이용은 관측소의 이전, 관측장비의 성능, 자료의 관리 등에 따라 신뢰도가 차이 나므로 관측 자료의 질을 높이는 노력이 필요하다고 본다.

상관관계분석은 선형회귀분석 방법과 MCP 방법을 이용하였는데, 재현주기 100년의 기본풍속은 1907년 이후의 전체 자료를 사용한 경우 44.1m/s(선형회귀분석), 53.9m/s(MCP) 이고, 1964년 이후의 풍속자료만 이용하였을 경우에는 26.3m/s(선형회귀분석), 31.9m/s(MCP)으로 MCP 방법이 선형회귀분석 방법에 비해 크게 추정되었다. 이는 MCP 방법에서 상관계수를 고려하지 않고 있어 상관관계식의 기울기가 선형회귀분석 방법에 비해 크기 때문인 것으로 생각된다.

이상의 연구는 단일지역에 대한 결과로서, 본 연구와 함께 향후 여러 현장에서 일련의 상관관계 분석을 수행한다면 종합적으로 두 방법에 의한 기본풍속 산정의 차이를 보다 명확히 보여줄 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 지역기술혁신 사업 호남/제주권 풍환경모델 및 내풍 기술 개발(내풍기술연구단, KWERC)과제 (2005~2010)의 제1 세부과제인 장대교량 내풍기술 클러스터 구축 연구결과의 일부입니다.



## References

- Kwon, S. D. and Lee, S. L. (2009). "Estimation of design wind velocity based on short term measurements." *Journal of KSCE*, Vol. 29, No. 3A, pp. 209-216 (in Korean).
- Kwon, S. D. and Lee, J. H. (2008). "Estimation of extreme wind speeds in southern and western coasts by typhoon simulation." *Journal of KSCE*, Vol. 28, No. 4A, pp. 431-438 (in Korean).
- Anthony L. Rogers, John W. Rogers, and James F. Manwell (2005). "Comparison of the performance of four measure-correlate-predict algorithms." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 93, pp. 243-264.
- Manwell, J. F., Rogers, A. L., McGowan, J. G. and Bailey, B. H. (2002). *An offshore wind resource assessment study for new england*, Renewable Energy, Vol. 27, pp. 175-187.
- Park, S. H., Jeon, J. W. and Lee, S. L. (2009). "Determination of wind speed based on long term and short term wind data at Mokpo Bridge." *Proceedings of Annual Conference of KSCE*, KSCE, pp. 2191-2194 (in Korean).
- European Committee for Standardization (2001). *Eurocode 1, Actions on structures-Part 1-4:General actions-Wind actions*.
- Honshu-Shikoku Bridge Authority (2001). *Wind resistant design manual for highway bridge* (in Japanese).
- Korean Society of Civil Engineers (2006). *Guideline of design for cable-supported steel bridge* (in Korean).
- Ministry of Construction and Transportation (2005). *Highway bridge design code* (in Korean).
- The Wind Engineering Insitute of Korea, The Korean Structural Engineer Association (2010). *Wind-resistant engineering*, Ki-moondang Co (in Korean).

### Appendix 1. Results of Correlation Analysis of Wind Speed

Linear regression analysis result using corrected data	Linear regression analysis result using raw data
$y = 1.0301x + 0.8431$ $R = 0.868$ $R^2 = 0.754$ $S_x = 1.675$ $S_y = 1.989$ $S_{yx} = 0.986$	$y = 1.1048x + 1.0913$ $R = 0.868$ $R^2 = 0.754$ $S_x = 2.022$ $S_y = 2.572$ $S_{yx} = 1.276$
MCP analysis result using corrected data	MCP analysis result using raw data
$y = 1.1874x + 0.771$ $R = 0.858$ $R^2 = 0.737$ $S_x = 1.675$ $S_y = 1.989$ $S_{yx} = 1.020$	$y = 1.2724x + 0.6176$ $R = 0.858$ $R^2 = 0.737$ $S_x = 2.022$ $S_y = 2.572$ $S_{yx} = 1.320$

where, x : wind data at reference site  
 y : wind data at target site  
 R : correlation coefficient  
 $R^2$  : reduction factor  
 $S_x$  : standard deviation of wind data at reference site  
 $S_y$  : standard deviation of wind data at target site  
 $S_{yx}$  : conditional standard deviation