

# 방음벽의 유무에 따른 박스형 거더교의 풍력계수 평가

정승환\* · 이영기\*\*

Jeong, Seung Hwan\*, Lee, Youngki\*\*

## Evaluation of Wind Force Coefficients of a Box-Type Girder Bridge with Noise Barriers

### ABSTRACT

In the study, computational fluid dynamics analysis was performed to estimate wind force coefficients for a box-type concrete girder bridge under the influence of wind. The drag, lift and pitching moment coefficients were obtained for the bridge section without noise barrier and compared with those of the bridge section with noise barriers of various heights. The shear stress transport  $k-\omega$  turbulence model was employed to estimate the wind force coefficients, and the contribution of the friction drag force to the total drag force was investigated. It was found from the study that the drag force coefficients increased as the height of noise barrier increased when a wind blew horizontally, and that the contribution of the friction drag force was highest for the bridge section without noise barrier. It is concluded that the impact of the height of noise barriers should be considered in the design of bridges, and the friction force played an important role in evaluating wind forces on bridges.

**Key words** : Noise barrier, Box-type bridge, Computational fluid dynamics, Wind force coefficients, Friction drag force coefficients

### 초록

본 연구에서는 바람의 영향을 받는 박스형 콘크리트 거더교에 대한 풍력계수를 산정하기 위하여 전산유체해석(CFD)을 수행하였다. 방음벽이 없는 교량 단면에 대한 항력계수, 양력계수 및 비틀림모멘트계수를 산정하였고, 이 풍력계수 값들을 다양한 높이의 방음벽을 갖는 교량 단면에 대한 풍력계수 값들과 비교하였다. 전산유체해석에서 풍력계수들을 산정할 때 전단응력수송(SST)  $k-\omega$  난류 모델을 적용하였고, 마찰 항력계수가 전체 항력계수에 미치는 기여도를 조사하였다. 연구 결과, 바람이 수평으로 불 때 항력계수는 방음벽의 높이가 커질수록 증가하였고, 마찰 항력의 기여도는 교량 단면에 방음벽이 없을 때 가장 높았다. 따라서 교량설계에서 풍력을 산정할 때 방음벽의 높이의 영향을 고려할 필요가 있으며, 벽면 마찰력은 교량에 작용하는 풍력을 산정할 때 중요한 역할을 하였다.

**검색어** : 방음벽, 박스형 교량, 전산유체해석, 풍력계수, 마찰항력계수

## 1. 연구배경 및 목적

최근 고속도로가 많이 건설되면서 동시에 많은 교량이 신설되거나 보강되고 있다. 이러한 고속화 도로에 설치된 교량 주변에 아파트, 사무실 등의 건축물이 있는 경우, 교통 소음으로 인해 사람들에게 피해를 줄 수 있다. 따라서 교량 구조물이 건설될 때에 방음벽도 함께 설치되고 있다. 그런데 방음벽이 설치된 교량에 강풍이나 태풍과 같은 강한 바람이 불었을 때 바람의 압력을 받는 풍압 면적이 늘어나게 되므로 이러한 풍압 증가량을 교량 설계에 고려할 필요가 있다.

\* 국민대학교 건설시스템공학부 책임연구원 (Kookmin University · jeongshw@naver.com)

\*\* 정회원 · 교신저자 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수 (Corresponding Author · Kookmin University · leeyou@kookmin.ac.kr)

Received July 8, 2018/ revised July 29, 2018/ accepted August 21, 2018

토목구조물에 작용하는 바람에 의하여 발생하는 풍력을 산정하기 위하여 풍동실험이나 전산유체해석(computational fluid dynamics analysis, CFD)을 수행하게 된다. 풍동실험은 크게 풍력실험과 풍압실험으로 나눌 수 있는데, 풍력실험에서는 풍력 실험 결과를 사용하여 단면의 세부적인 설계를 수행하기가 어렵다는 단점이 있다. 풍압실험에서는 구조물 표면에 수직으로 작용하는 압력만이 측정되고 구조물 표면에 평행하게 작용하는 벽면 전단력을 측정할 수가 없다. 전산유체해석(CFD)은 구조물 표면에 수직으로 작용하는 압력뿐만 아니라 구조물 표면에 평행하게 작용하는 벽면 전단력도 산정할 수 있다. 현재 도로교 설계기준(Korea Institute of Bridge and Structural Engineers, 2015)에는 교량의 설계풍압을 산정하는 기준이 제시되어 있으나, 전산유체해석(CFD)을 사용하면 교량 단면의 세부적인 형상도 고려하여 풍압을 산정할 수 있다. Fransos and Bruno(2010)는 전산유체해석(CFD)에 의해 사다리꼴 형상의 교량 데크(deck)의 공기 역학적인 거동을 조사하였는데, 데크 모서리 부분의 형상이 변화함에 따른 풍력계수를 산정하였다. Sarwar et al.(2008)은 LES 난류 모델을 사용한 3차원 전산유체해석을 통해 박스 거더교에 작용하는 풍력을 산정하였다. Han et al.(2016)은 세 가지 유형의 교량 단면의 항력계수를 전산유체해석을 통해 산정하였는데, 레이놀즈수와 방호울타리의 유무에 따른 항력계수를 산출하였다. Mannini et al.(2010)은 2차원 직사각형 단면 주위의 유동 현상을 난류 모델인 URANS 방정식을 사용하여 다양한 레이놀즈수에 대하여 해석한 후, 풍동실험 결과와 비교하였다. Miranda et al.(2015)은 전산유체해석에서 RANS 및 LES 난류 모델을 사용하여 최근 장경간 교량에 많이 사용되는 트윈(twin) 박스 교량 데크 주위의 유동을 고찰하였다. 그들은 데크 사이의 간격이 넓어질수록 두 데크 사이에 강한 동적인 상호작용이 발생한다는 것을 발견하였고, 이 결과를 실험 데이터와 비교하였다.

본 연구에서는 전산유체해석(CFD)에 의해 교량 단면에 방음벽이 없는 경우와 교량 단면의 좌측과 우측, 그리고 중앙분리대 부근에 방음벽이 있을 때 방음벽의 높이에 따라 풍력이 어떻게 변화하는지를 조사하였다. 또한 구조물 표면의 벽면 전단력(마찰력)을 잘 산정할 수 있는 Shear Stress Transport  $k-\omega$  난류 모델을 사용하여 교량 단면의 풍력계수를 산정하였고, 벽면 전단력(마찰력)이 풍력 산정에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 전산유체해석 모델링 및 경계조건

본 연구에서는 교량 단면의 높이와 길이의 비인 형상비(D/L)가 0.15인 거더교의 1/80 축척으로 축소된 모델을 사용하여

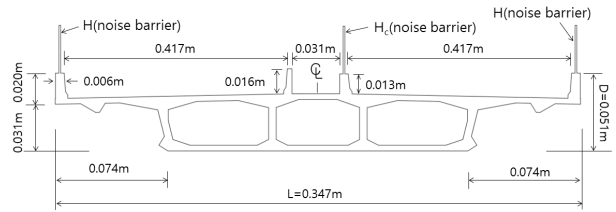


Fig. 1. Model of a Box-Type Girder Bridge for CFD

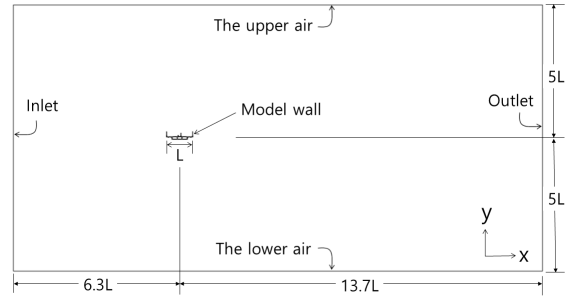


Fig. 2. Flow Area and Boundary Conditions of a Box-Type Girder Bridge for CFD

전산유체해석이 이루어졌다. Fig. 1은 전산유체해석을 위해 사용된 BOX형 콘크리트 거더교의 모델을 보여준다. 이 BOX형 콘크리트 거더교에 방음벽이 없는 경우( $H=0$ )와 거더교에 높이  $H$ 의 방음벽이 있는 경우에 대해 전산유체해석이 이루어졌다. 거더교에 방음벽이 있는 경우는 높이가 서로 다른 4가지 유형의 방음벽이 고려되었다. 이 4가지 유형의 방음벽의 높이는  $H=0.013m, 0.031m, 0.05m$  및  $0.069m$ 이었는데, 방음벽의 실제 크기는 각각  $H_p=1m, 2.5m, 4.0m$  및  $5.5m$ 에 해당되었다.

BOX형 콘크리트 거더교의 전산유체해석을 위해서는 교량 구조물 주위의 유동 영역을 설정하고, 이 유동 영역의 경계조건을 정해주어야 한다. Fig. 2는 전산유체해석을 위해 사용된 BOX형 콘크리트 거더교의 주위 유동 영역을 보여준다. 거더교 모델의 전단중심으로부터 유동 영역의 입구단, 출구단 및 상단까지의 길이는 각각 거더교 모델 길이( $L$ )의 약 6.3배, 13.7배 및 5배로 충분히 넓게 설정하였다. 또한 Fig. 2는 CFD 해석 프로그램인 MIDAS NFX(2017)를 사용하여 입력된 경계조건을 보여주고 있다. 경계조건은 입구단, 출구단, 상단외기, 하단외기, 구조물 벽면으로 총 5개가 정해졌다. 입구단의 입력된 풍속은  $7.5m/sec$ , 출구단의 압력은 0으로 설정되었다. 상단외기와 하단외기 경계조건에서는 수직방향( $y$  방향)으로의 유속은 0으로 설정되었다. 구조물 벽면은 무차원 벽면거리 조건(첫 번째 절점에서  $x$  방향 유속은 0)으로 설정되었다. Fig. 3은 BOX형 콘크리트 거더교의 전산유체해석을 위해 생성된 요소를 보여주고 있다. BOX형 콘크리트 거더교의 풍압 분포와 주위의 유속

분포의 해석은 유한요소법(Finite Element Method)에 의한 것으로서, CFD 해석 프로그램인 MIDAS NFX가 사용되었다. 해석을 위해 삼각형 및 사각형 요소(triangular and tetragonal mesh)가 생성되었다. 해석에 사용된 요소의 개수는 233,000개 정도였다. 각 해석 케이스에 대해 10,000번의 반복(iterations)이 이루어졌고, 해석 소요 시간은 한 해석 케이스 당 약 4시간이 소요되었다.

본 연구에서는 전산유체해석 모델로 구조물 주위의 경계층 유동을 잘 나타낼 수 있는, 특히 구조물 표면에 작용하는 전단응력을 잘 산정할 수 있는 k- $\omega$  (Shear Stress Transport) 난류 모델을 사용하였다. 유동현상을 나타내기 위한 Navier-Stokes 방정식(Myeong Hyeon Gook, 2012)은 난류모델의 기초가 되는 식으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1)$$

위 식에서  $i$ 는 1, 2, 3이며,  $(x_1, x_2, x_3)$ 은  $(x, y, z)$  좌표를,  $(u_1, u_2, u_3)$ 은  $x, y, z$  방향의 속도 성분  $(u, v, w)$ 를 나타낸다.  $p$ 는 압력을,  $\rho$ 는 공기의 밀도를, 그리고  $\mu$ 는 공기의 점성을 나타낸다.

Fig. 4는 풍방향 풍력인 항력(drag)  $F_D$ , 풍직각방향 풍력인 양력(lift)  $F_L$ , 비틀림모멘트  $M_T$ 의 방향을 보여준다. Fig. 4에서 x 방향은 풍방향(along-wind)이고, y 방향은 풍직각방향(across-wind)을 나타낸다. 또한 풍향을 나타내는  $\alpha$ 의 방향이 정의되어 있다. 그림에 나타난 수평선을 기준으로 시계 방향을 정(+의 풍향)으로 정의하였다.

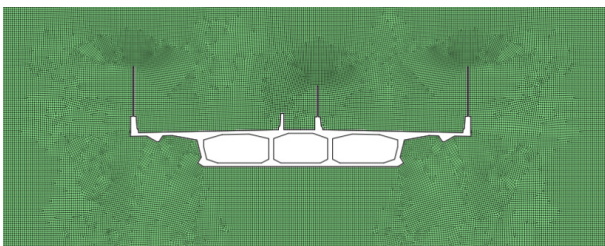


Fig. 3. Mesh Generated for CFD Analysis of a Box-Type Girder Bridge

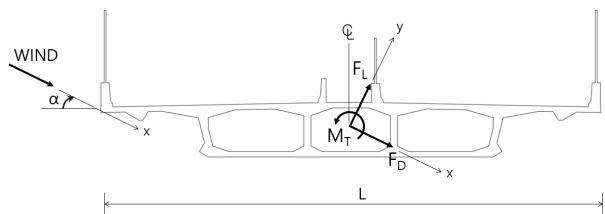


Fig. 4. Definition of Wind Force and Wind Direction

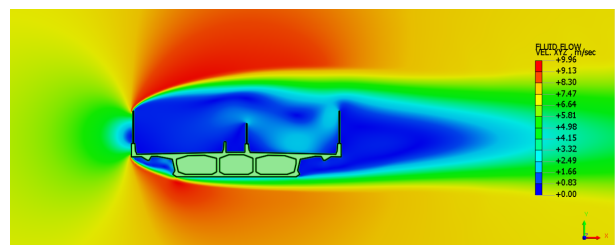
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 풍속 및 풍압 분포

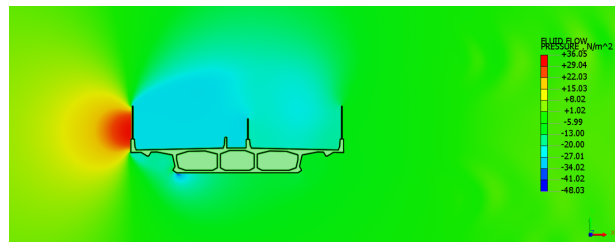
Fig. 5는 전산유체해석에 의해 얻어진 박스형 거더교 단면 주위의 풍속 분포 및 풍압 분포를 보여준다. 이 그림의 풍속 및 풍압 분포는 풍향  $\alpha = 0^\circ$  일 때 방음벽의 높이  $H=0.05m$  (실제 높이  $H_p=4.0m$ )에 대한 것이다. Fig. 5(a)의 풍속 분포를 보면 풍상측에 있는 방음벽의 높이 중간 정도에서 정체점이 발생하는 것을 알 수 있고, 방음벽의 상부와 거더 하부에 풍속의 증가 현상이 나타나고 있다. Fig. 5(b)의 풍압 분포를 보면 풍상측에 있는 방음벽에 강한 정(+의) 압력이 발생하고 있으나, 방음벽과 방음벽 사이인 도로면 상부에는 부(-)의 압력이 발생함을 알 수 있다.

#### 3.2 풍동실험 결과와의 비교

Fig. 6은 방음벽이 없는 경우에 전산유체해석에서 얻어진 풍향별 항력계수( $C_D$ ), 양력계수( $C_L$ ) 및 비틀림모멘트계수( $C_M$ )를 풍동실험 결과와 비교한 것이다. 풍동실험은 Daewoo Institute of Construction Technology(2017)에서 동일한 모형에 대하여 수행된 것이다. Fig. 6으로부터 전산유체해석에서 얻어진 풍력계수와 풍동실험에서 얻어진 결과가 매우 유사함을 알 수 있다. 전산유체해석 결과와 풍동실험 결과의 차이는 항력계수의 경우 고려된 전 풍향에 대하여 평균적으로 0.03 정도, 양력계수의 경우 풍향  $-2$ 도와  $-4$ 도를 제외한 전 풍향에 대하여 평균적으로 0.03 정도, 비틀림모멘트의 경우 전 풍향에 대하여



(a) Wind Velocity Distribution



(b) Wind Pressure Distribution

Fig. 5. Wind Velocity and Wind Pressure Distributions Around a Box-Type Girder Bridge from CFD Analysis

평균적으로 0.005 정도였다. Daewoo Institute of Construction Technology(2017)에서 수행한 풍동실험 보고서를 검토한 결과 교량 단면의 양쪽 방호벽 형상과 중앙분리대 부분의 방호벽 형상이 직사각형 형태로 제작되어 실제 형상에 비해 단순화되어 있는데, 이런 단순화가 실험과 해석 결과의 차이가 발생하는 한 원인이 된 것으로 사료된다.

### 3.3 풍향에 따른 풍력계수

Fig. 7과 Tables 1~3은 교량 단면에 방음벽이 없을 때의 풍향에 따른 항력계수, 양력계수 및 비틀림모멘트계수를 보여준다. Fig. 7(a)는 풍향에 따른 항력계수( $C_D$ )를 보여준다. 풍향  $\alpha = 0^\circ$  일 때의 항력계수는 0.118이고, 이  $\alpha = 0^\circ$  를 지나가는 선을 대칭축으로 하여 풍향이 양 또는 음의 방향으로 증가함에

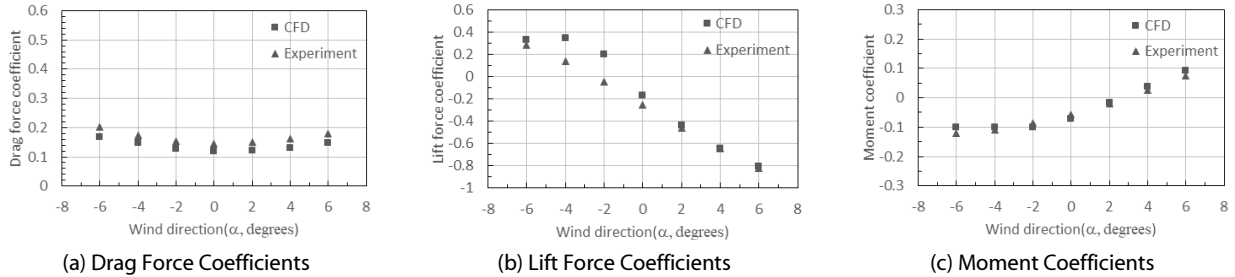


Fig. 6. Comparison of Force Coefficients of CFD with Those of Wind Tunnel Experiments for a Bridge Section without Noise Barrier

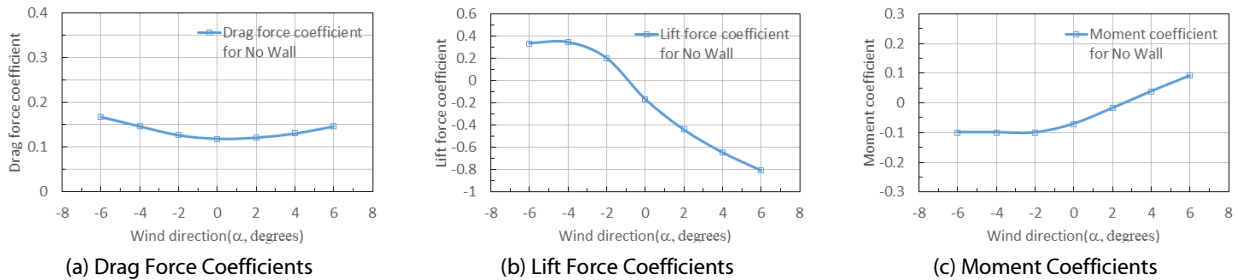


Fig. 7. Force Coefficients of a Bridge Section without Noise Barrier According to Wind Direction

Table 1. Drag Force Coefficients According to the Height of Noise Barrier and Wind Direction

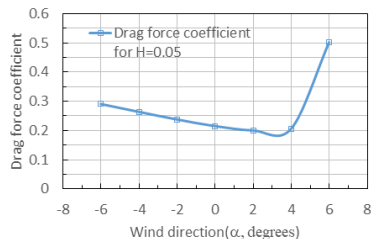
H (m)	$\alpha$ (deg.)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.168	0.147	0.126	0.118	0.121	0.130	0.146
0.013	0.198	0.176	0.155	0.142	0.144	0.153	0.169
0.031	0.240	0.215	0.190	0.171	0.169	0.185	0.206
0.050	0.290	0.263	0.237	0.215	0.200	0.205	0.501
0.069	0.556	0.591	0.639	0.215	0.635	0.677	0.691

Table 2. Lift Force Coefficients According to the Height of Noise Barrier and Wind Direction

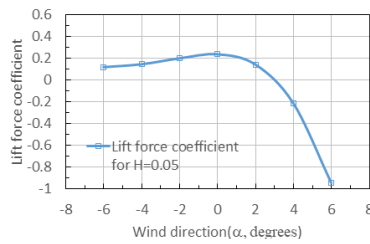
H (m)	$\alpha$ (deg.)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.334	0.343	0.202	-0.167	-0.441	-0.645	-0.808
0.013	0.272	0.301	0.281	-0.016	-0.415	-0.631	-0.766
0.031	0.195	0.226	0.266	0.197	-0.208	-0.585	-0.758
0.050	0.118	0.144	0.198	0.236	0.142	-0.214	-0.945
0.069	0.250	0.148	-0.091	0.236	-0.527	-0.720	-0.942

Table 3. Moment Coefficients According to the Height of Noise Barrier and Wind Direction

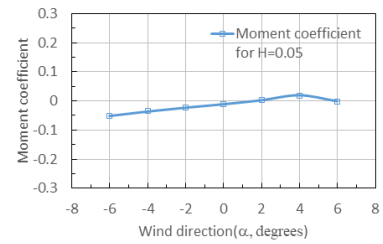
H (m)	$\alpha$ (deg.)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	-0.099	-0.100	-0.100	-0.071	-0.018	0.038	0.091
0.013	-0.078	-0.071	-0.068	-0.058	-0.021	0.032	0.081
0.031	-0.064	-0.053	-0.044	-0.039	-0.022	0.014	0.050
0.050	-0.050	-0.036	-0.023	-0.011	0.002	0.018	-0.001
0.069	-0.133	-0.136	-0.141	-0.011	-0.103	-0.078	-0.048



(a) Drag Force Coefficients



(b) Lift Force Coefficients



(c) Moment Coefficients

Fig. 8. Force Coefficients of a Bridge Section with Noise Barrier (H=0.05m) According to Wind Direction

Table 4. Rate of Change of Drag Force Coefficients with Noise Barrier

H (m)	Rate of change (%)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0.013	17.6	19.9	22.8	19.9	19.5	17.6	15.2
0.031	42.9	46.4	50.4	44.7	40.0	42.6	40.7
0.050	72.6	79.6	87.8	81.8	65.6	57.8	242.4
0.069	230.7	302.6	405.5	81.8	426.1	420.7	372.6

따라 항력계수는 대칭적으로 증가하고 있다. 풍향이  $\alpha = 2^\circ$  에서  $\alpha = 6^\circ$  까지 증가함에 따라 항력계수는 0.121에서 0.146으로 증가하였다.  $\alpha = -2^\circ$  에서  $\alpha = -6^\circ$  까지 음의 방향으로 증가함에 따라 항력계수는 0.126에서 0.168로 증가하였다. 음의 풍향이 작용할 때는 풍상면의 바람을 받는 면적이 늘어나므로 항력계수는 증가하게 되는 것이다.

Fig. 7(b)는 방음벽이 없을 때 풍향에 따른 양력계수( $C_L$ )를 보여준다. 풍향  $\alpha = -2^\circ, -4^\circ$  및  $-6^\circ$  일 때, 즉 음의 풍향이 작용할 때는 양력계수는 모두 정(+ )의 값을 보여주고 있다. 이 정(+ )의 양력은 바람에 의해 교량 슬래브와 거더를 위로 들어 올리는 힘이다. 그러나 풍향  $\alpha = 0^\circ$  와  $\alpha = 2^\circ, 4^\circ$  및  $6^\circ$  일 때에는 양력계수는 부(-)의 값을 나타내고 있는데, 이 부(-)의 양력은 바람에 의해 교량 슬래브와 거더를 지면 방향으로 내리 누르는 힘이다. 특히 풍향  $\alpha = 6^\circ$  일 때 양력계수  $C_L = -0.808$ 로서 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7(c)는 방음벽이 없을 때 풍향에 따른 비틀림모멘트계수

( $C_M$ )를 보여준다. 방음벽이 없는 경우 비틀림모멘트계수는 항력계수와 양력계수에 비해서 크기가 작음을 알 수 있다.  $\alpha = 0^\circ$  와  $2^\circ$  및 음의 풍향일 때 비틀림모멘트계수는 -0.018에서 -0.1의 범위에서 부(-)의 값(시계방향)을 나타내지만,  $\alpha = 4^\circ$  와  $\alpha = 6^\circ$  일 때에는 각각 0.038과 0.091로 정(+ )의 값(반시계 방향)을 나타내었다.

Fig. 8과 Tables 1~3은 교량 단면의 양 쪽 방호벽 부분에 높이  $H=0.05m$  (실제  $H_p=4.0m$ )인 방음벽이 설치되고, 중앙분리대 부분에는 높이  $H=0.031m$  (실제  $H_p=2.5m$ )인 방음벽이 설치되었을 때의 풍향에 따른 항력계수, 양력계수 및 비틀림모멘트계수를 보여준다. Fig. 8(a)는 풍향에 따른 항력계수( $C_D$ )를 보여준다. 풍향  $\alpha = 0^\circ$  일 때의 항력계수는 0.215인데, 이 값은 방음벽이 없을 때의 값에 비해서 약 82% 증가한 값이다(Table 4 참조).  $H=0.05m$  (실제  $H_p=4.0m$ )인 방음벽이 설치되었을 때 풍향  $\alpha = 2^\circ$  에서  $\alpha = -6^\circ$  에 이르기까지 풍향이  $\alpha = 2^\circ$  씩 감소함에 따라 항력계수는 0.200에서 0.290에 이르기까지 완만

Table 5. Rate of Change of Lift Force Coefficients with Noise Barrier

H (m)	Rate of change (%)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0.013	-18.5	-12.2	39.6	-90.3	-5.8	-2.2	-5.2
0.031	-41.5	-34.2	32.0	18.0	-52.8	-9.3	-6.1
0.050	-64.7	-58.0	-1.8	41.5	-67.8	-66.8	17.0
0.069	-25.0	-56.8	-54.8	41.5	19.5	11.7	16.7

Table 6. Rate of Change of Moment Coefficients with Noise Barrier

H (m)	Rate of change (%)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0.013	-21.3	-28.6	-31.6	-18.4	16.9	-18.0	-11.4
0.031	-35.8	-47.2	-55.8	-44.8	22.5	-64.0	-45.6
0.050	-49.5	-64.4	-77.2	-83.8	-89.8	-51.9	-98.5
0.069	33.9	36.9	40.8	-83.8	474.0	102.9	-47.0

하게 증가하였다. 풍향이  $\alpha = 4^\circ$  에서  $\alpha = 6^\circ$  로 변화할 때 항력계수는 0.205에서 0.501로 급격히 증가하였다. Table 4에 나타난 대로 풍향  $\alpha = -2^\circ, -4^\circ$  및  $-6^\circ$  일 때 항력계수는 방음벽이 없는 경우보다 각각 88%, 80% 및 73% 정도 증가하였고, 풍향  $\alpha = 2^\circ, 4^\circ$  및  $6^\circ$  일 때의 항력계수는 방음벽이 없는 경우보다 각각 66%, 58% 및 242% 정도 증가하였다.

Fig. 8(b)는  $H=0.05m$  (실제  $H_p=4.0m$ )인 방음벽이 설치되었을 때 풍향에 따른 양력계수( $C_L$ )를 보여준다. 풍향  $\alpha = 0^\circ$  에서  $\alpha = -6^\circ$  에 이르기까지 풍향이 2도씩 감소함에 따라 양력계수는 0.236에서 0.118에 이르기까지 완만하게 감소하였고, 상향인 정압을 나타내었다. 풍향  $\alpha = 2^\circ$  에서 양력계수는 정압인 0.142 이었고, 풍향이  $\alpha = 4^\circ$  에서  $\alpha = 6^\circ$  로 변화할 때 항력계수는 -0.214에서 -0.945로 부의 압력의 크기가 급격히 증가하였다. Table 5에 나타난 것과 같이,  $H=0.05m$  (실제  $H_p=4.0m$ )인 방음벽이 설치되었을 때  $\alpha = 0^\circ$  와  $\alpha = 6^\circ$  인 경우를 제외하고 양력계수의 절대적인 크기는 방음벽이 없을 때에 비해 2~68% 정도 감소하였다.

Fig. 8(c)는  $H=0.05m$  (실제  $H_p=4.0m$ )인 방음벽이 설치되었을 때 풍향에 따른 비틀림모멘트계수( $C_M$ )를 보여준다. 방음벽이 없을 때와 유사하게 비틀림모멘트계수는 항력계수와 양력계수에 비해서 크기가 작음을 알 수 있고,  $\alpha = 0^\circ$  와  $\alpha = 6^\circ$  및 음의 풍향일 때 비틀림모멘트계수는 -0.001에서 -0.050의 범위에 있어 부(-)의 값(시계방향)을 나타내었지만,  $\alpha = 2^\circ$  와  $\alpha = 4^\circ$  일 때에는 각각 0.002에서 0.018로 정(+)의 값(반시계방향)을 나타내었다. 또한 Table 6에 나타난 대로 방음벽이 없을 때에 비해 비틀림모멘트계수의 절대적인 크기는 49~99% 정도 감소하였다.

### 3.4 방음벽의 높이에 따른 풍력계수

Fig 9는 풍향  $\alpha = 0^\circ$  에 대하여 방음벽의 높이에 따른 항력계수를 보여준다. 방음벽이 없을 때 항력계수( $C_D$ )는 0.118이었고, 방음벽의 높이가 증가함에 따라서 항력계수는 증가하였다. 방음벽의 높이  $H=0.05m$ 일 때 항력계수의 값은 0.215이었다.

풍향  $\alpha = 0^\circ$  에 대하여 방음벽의 높이에 따른 양력계수와 관련하여, 방음벽이 없거나 방음벽의 높이  $H=0.013m$ 로 낮을 때에 양력계수( $C_L$ )는 부(-)의 압력(교량 슬래브와 거더를 아래로 내리 누르는 힘)을 보여주었다. 방음벽의 높이가  $H=0.013m$ 보다 더 큰 경우에 양력계수는 정(+)의 압력을 보여 주었으며, 방음벽의 높이가 증가함에 따라 양력계수도 증가하였다. 방음벽의 높이  $H=0.05m$ 일 때 양력계수의 값은 0.236이었다.

풍향  $\alpha = 0^\circ$  에 대하여 방음벽의 높이에 따른 비틀림모멘트계수와 관련하여, 비틀림모멘트계수( $C_M$ )의 값은 방음벽이 없을 때와 방음벽이 있을 때 모두 부(-)의 값(시계 방향)을 보여 주었다. 방음벽이 없을 때에 가장 큰 부(-)의 비틀림모멘트계수  $C_M=-0.071$ 이 발생하였고, 방음벽의 높이가 증가함에 따라서

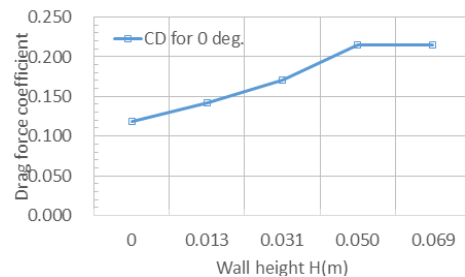


Fig. 9. Drag Force Coefficients According to the Height of Noise Barrier for the Wind Direction of 0 Degrees

부(-)의 비틀림모멘트계수의 값은 감소하였다.

### 3.5 벽면 전단력이 전체 항력계수에 미치는 기여도

이전 장에서 전산유체해석(CFD)에 의해 산정된 항력계수, 양력계수 및 비틀림모멘트계수는 교량의 면에 평행하게 작용하는 벽면 전단력(마찰력)을 고려하여 계산된 것이다. 만일 이 계수들의 산정에서 벽면 전단력을 고려하지 않는다면 결과로 얻어지는 값들은 달라질 것이고, 교량에 작용하는 풍력을 정확하게 산정할 수 없을 것이다. 따라서 본 연구에서는 벽면 전단력(마찰력)이 풍력계수의 산정에 어느 정도의 기여를 하는지 알아보기 위하여 풍력계수(항력계수와 양력계수)에 대한 벽면 전단력의 기여도를 계산하였다. 항력계수에 대한 벽면 전단력(마찰력)의 기여도는 다음 식에 의하여 계산되었다.

$$\text{마찰 항력계수의 기여도} \quad (2)$$

$$= \frac{\text{벽면 전단(마찰) 항력계수}}{\text{전체 항력계수}} \times 100\%$$

이 마찰 항력계수의 기여도는 벽면 전단(마찰) 항력계수가 전체 항력계수에서 차지하는 비율을 나타낸 것이다.

Fig. 10은 풍향이 변화함에 따라 마찰 항력계수의 기여도가 어떻게 변화하는지를 나타낸다. 방음벽이 없는 경우 마찰 항력계수의 기여도는 풍향  $\alpha = -6^\circ \sim \alpha = 6^\circ$  에 대하여 25%에서 76% 정도로 나타났다. 특히  $\alpha = 0^\circ$  와 양의 풍향인  $\alpha = 2^\circ$ ,  $\alpha = 4^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$  에 대하여 마찰 항력계수의 기여도가 크게 나타났다. 방음벽의 높이가  $H=0.013\text{m}$  일 때 마찰 항력계수의 기여도는 풍향  $\alpha = -6^\circ \sim \alpha = 6^\circ$  에 대하여 18%에서 43% 정도로 나타났다. 방음벽의 높이가  $H=0.031\text{m}$  일 때 마찰 항력계수의 기여도는 풍향  $\alpha = -6^\circ \sim \alpha = 6^\circ$  에 대하여 10%에서 33% 정도로 나타났다. 방음벽의 높이가  $H=0.05\text{m}$  일 때에는 마찰 항력계수의 기여도는 모든 풍향에 대하여 16%에서 41% 정도로 나타났다. 방음벽의 높이가 가장 높은 경우인  $H=0.069\text{m}$  일 때에 마찰 항력계수의 기여도는 모든 풍향에 대하여 22%에서 50% 정도로 나타났다. 연구 결과 전체 항력계수에 대한 마찰 항력계수의 기여도는 방음벽이 없을 때 가장 높았고, 이 높은 기여도를 나타낸 풍향은  $\alpha = 0^\circ$  와 양의 풍향인  $\alpha = 2^\circ$ ,  $\alpha = 4^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$  이었다.

Fig. 11은 풍향이 변화함에 따라 마찰 양력계수의 기여도가 어떻게 변화하는지를 나타낸다. 방음벽이 없는 경우 마찰 양력계수의 기여도는 풍향  $\alpha = 0^\circ$  와  $\alpha = 2^\circ$  에 대해서 각각 3.5% 와 0.1% 정도로 매우 작았다. 이 두 풍향을 제외한 나머지 5개 풍향에 대하여 마찰 양력계수의 기여도는 -1.1%에서 -2.8%

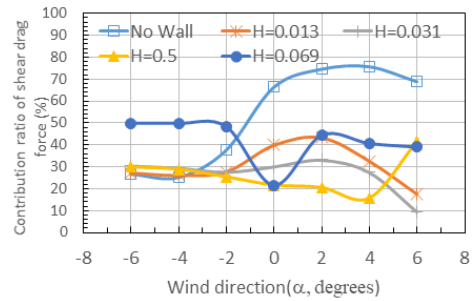


Fig. 10. Contribution Ratio of Shear (Friction) Drag Force According to Wind Direction

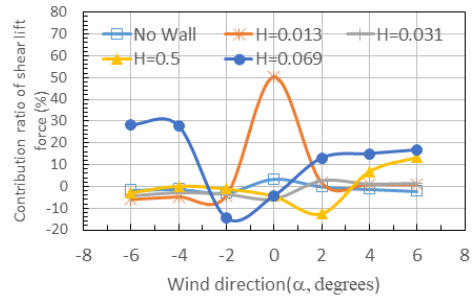


Fig. 11. Contribution Ratio of Shear (Friction) Lift Force According to Wind Direction

정도로 벽면 전단력(마찰력)이 오히려 전체 양력계수를 감소시키는 역할을 하였으나, 그 감소량은 작았다. 방음벽의 높이가  $H=0.013\text{m}$  일 때 마찰 양력계수의 기여도는 풍향  $\alpha = 0^\circ$  를 제외한 다른 풍향에서 -5.8%에서 1.9% 정도로 나타났다. 방음벽의 높이가  $H=0.031\text{m}$  일 때 마찰 양력계수의 기여도는 모든 풍향에 대하여 -5.6%에서 2.6% 정도로 나타났다. 방음벽의 높이가  $H=0.05\text{m}$  일 때에는 마찰 양력계수의 기여도는 풍향  $\alpha = -4^\circ$ ,  $\alpha = 4^\circ$  및  $\alpha = 6^\circ$  에 대하여 각각 0.2%, 6.7% 및 13.3% 정도로 나타났다. 이 세 풍향 이외의 풍향에 대한 마찰 양력계수의 기여도는 -1.2%에서 -12.4% 정도로 전체 양력계수를 감소시키는 역할을 하였다. 방음벽의 높이가 가장 높은 경우인  $H=0.069\text{m}$  일 때에 모든 풍향에 대하여 마찰 양력계수의 기여도는 -14.4%에서 28% 정도로 나타났다. 연구 결과 전체 양력계수에 대한 마찰 양력계수의 기여도는 몇 개의 풍향을 제외하고 비교적 낮았다.

## 4. 결론

본 연구에서는 교량 단면의 높이와 길이의 비인 형상비가 0.15인 BOX형 콘크리트 거더교 단면에서 바람에 의해 발생하는 풍력계수를 전산유체해석(CFD)을 통해 산정하였다. 풍향이

수평( $\alpha = 0^\circ$ )일 때, 방음벽이 없을 경우 항력계수는 0.118이었고, 방음벽의 높이(H)가 0.013m에서 0.05m로 증가함에 따라서 항력계수는 0.142에서 0.215로 증가하였다. 양력계수는 방음벽이 없거나 낮을 때 부의 값을 보여주었으나, 방음벽의 높이가 증가할수록 정의 값을 보여주었다. 방음벽이 없을 경우 양력계수는 -0.167, 방음벽이 0.05m일 때 0.236이었다. 비틀림모멘트는 방음벽이 없을 때 -0.071이었고, 방음벽이 0.05m일 때 -0.011로 방음벽의 높이가 높아짐에 따라 그 크기가 감소하였다. 연구 결과, 방음벽의 높이의 변화는 항력계수의 변화에 가장 큰 영향을 주었고, 따라서 교량설계에서 풍력을 산정할 때 방음벽의 높이의 영향을 고려할 필요가 있다. 또한, 본 연구에서는 풍향이 변화함에 따라 마찰 항력계수의 기여도를 산정하였다. 전체 항력계수에 대한 마찰 항력계수의 기여도는 방음벽이 없을 때 가장 높았는데, 이 경우 마찰 항력계수의 기여도는 25%에서 76%의 범위에 있었다. 전체 양력계수에 대한 마찰 양력계수의 기여도는 몇 개의 풍향을 제외하고 전반적으로 낮게 나타났다. 따라서 교량에 작용하는 풍력을 산정할 때 벽면 전단력(마찰력)을 고려하여야 하며, 전산유체해석은 이러한 마찰력을 고려할 수 있는 하나의 좋은 도구라 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 (주)대우건설의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

- Daewoo Institute of Construction Technology (2017). *Wind Safety Investigation Report of Baebang Bridge on Asan-Cheonan Zone 3* (in Korean).
- Fransos, D. and Bruno, L. (2010). "Edge degree-of-sharpness and free-stream turbulence scale effects on the aerodynamics of a bridge deck." *Journal Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 98, pp. 661-671.
- Han, Y., Chen, H., Cai, C. S., Xu, G., Shen, L. and Hu, P. (2016). "Numerical analysis on the difference of drag force coefficients of bridge deck sections between the global force and pressure distribution methods." *Journal Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 159, pp. 65-79.
- Korea Institute of Bridge and Structural Engineers·Bridge Design Core Technology Research Group (2015). *Highway Bridge Design Code(Limit State Design) and Commentary* (in Korean).
- Mannini, C., Soda, A. and Schewe, G. (2010). "Unsteady RANS modelling of flow past a rectangular cylinder: Investigation of Reynolds number effects." *Computers and Fluids*, Vol. 39, No. 9, pp. 1609-1624.
- MIDAS NFX (2017). *CFD User's Manual*, MIDAS.
- Miranda, S., Patruno, L., Ricci, M. and Ubertini, F. (2015). "Numerical study of a twin box bridge deck with increasing gap ratio by using RANS and LES approaches." *Engineering Structures*, Vol. 99, No. 15, pp. 546-558.
- Myeong, H. G. (2012). *CFD*, Munundang (in Korean).
- Sarwar, M. W., Ishihara, T., Shimada, K., Yamasaki, Y. and Ikeda, T. (2008). "Prediction of aerodynamic characteristics of a box girder bridge section using the LES turbulence model." *Journal Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 96, pp. 1895-1911.