

강합성 단면을 가진 사장교의 와류진동 발생 예측

Prediction of Vortex-induced Vibration of the Cable-Stayed Bridge with Steel Composite Deck

조재영·조영래·이학은

Cho, JaeYoung · Cho, YoungRae · Lee, HakEun

Abstract

After over a century of effort by researchers and engineers, the problem of bluff body flow, in particular vortex shedding frequency, remains almost entirely in the empirical, descriptive realm of knowledge. Computational methods have been systematically applied for vortex-induced vibrations of the cable-stayed bridge with steel composite deck by unsteady wind loadings due to vortex-shedding. The focus of this paper is to predict the vortex-induced vibration of the cable-stayed bridge with steel composite deck based computational fluid dynamics(CFD).

key words : CFD, Vortex-induced Vibration, Cable-Stayed Bridge

1. 서론

구조물에 직각방향으로 바람이 작용하게 되면 구조물 후면에 공기흐름의 박리현상이 일어나면서 와류가 발생하게 된다. 발생한 와류는 주기적으로 생성과 소멸을 반복하면서 유체운동의 직각방향으로 주기적인 힘을 구조물에 가하게 된다. 구조물의 후면이나 측면에서 생성되는 주기적인 와류의 양상은 단면형상과 Reynolds수에 영향을 받으며, Strouhal수에 의하여 와류방출특성을 정의한다. Strouhal수는 단면형상과 Reynolds수에 따라서 변화하기 때문에 이론적인 정해를 구할 수는 없고 실험이나 수치해석을 통하여 계산하게 된다.

본 연구에서는 사장교의 강합성 플레이트거더 단면에 대하여 CFD (Computational Fluid Dynamics)를 이용한 전산수치해석을 실시하여 정적설계를 위한 보강형 단면의 공기력계수 및 단면에 작용하는 풍압을 살펴 보았다. 보강형 단면의 공기력 계수는 유입 풍방향의 항력계수, 수직 방향의 양력계수 그리고 회전 방향의 모멘트계수로 나누어 영각 -9° , -6° , -3° , 0° , 3° , 6° , 9° 에 대하여 평균값 및 RMS값에 대하여 나타내었으며, 산출된 공기력은 풍동실험결과 및 관련 국내 설계기준의 값과 비교, 검토하여 타당성을 평가하였다. 또한, 단면 후위에 방출되는 와류의 주기를 통해 산출된 스트로할 수를 통해 와류진동을 특성 및 와류진동 발생풍속을 예측하였다.

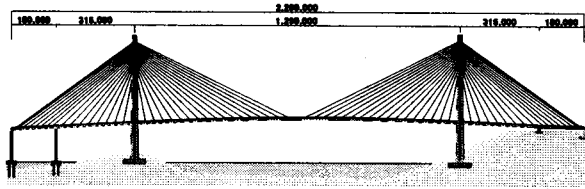
2. CFD 해석

검토 대상 사장교는 중앙경간이 430m, 측경간이 각각 165m로 이루어진 총 경간 760m의 2주탑 3경간 사장교이다. 그림 1은 본 연구의 대상이 되는 사장교의 종평면도, 표준횡단면도의 일반도를 나타낸다. 보강형 단면은 콘크리트 바닥판과 양단의 I형 강주형이 결합된 강합성 단면으로 이루어져 있으며, 케이블은 보강형 단면의 양단 끝 부분에 배치되어 있다. 주형의 폭은 25.9m이며 형고는 3.18m이며, 검토 대상 교량의 연직 1차 횡진동수는 0.319Hz, 비틀림 1차 진동수는 0.524Hz이다.

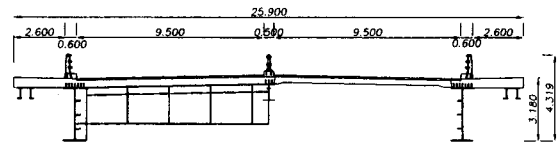
* 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 · 박사수로 · satokoge@korea.ac.kr

** 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 · 박사수로 · shalom0728@korea.ac.kr

*** 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수 · 공학박사 · helee@korea.ac.kr



(a) 종평면도



(b) 표준형 단면도

그림 1. 검토대상 교량

검토 대상 사장교의 정적 공기력계수 산출을 위하여 보강형에 대하여 대표단면을 설정하고, CFD (Computational Fluid Dynamics)에 의한 수치해석을 수행하였다. CFD해석은 식(1)과 같은 Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식을 이용하여 수행하였다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \partial u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu + \nu_{SGS}) \bar{s}_{ij}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad \bar{s}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}$$
(1)

여기서, \bar{u}_i : 속도, \bar{P} : 압력, ν : 동점성계수, ν_{SGS} : Subgrid-scale 점성계수, ρ : 유체밀도

2차원 모델을 적용하였으며, 유동장의 해석에 있어서는 Finite Volume Method (FVM)를 적용한 범용 CFD 코드인 Fluent 6.2를 이용하였다. 해석 방법에는 Segregated Solver가 이용되었으며 2D에서 Implicit Formulation을 적용하였다. 시간에 대한 계산은 Unsteady 상태로 전개하였으며, Unsteady Formulation은 2nd-Order Implicit Method를 적용하였다. 수렴기준은 항력계수의 안정성을 확보하기 위하여 1.e-4의 값이 적용되었다. 난류모델은 5개의 방정식으로 이루어진 Reynolds stress model(RSM)을 사용하였으며, 해석에 사용된 난류강도 I_u 는 1%이며 대표 난류스케일은 0.1B를 적용하였다. 압력과 속도의 Coupling은 PISO Algorithm을 적용하였고 압력의 이산화는 PRESTO!를 사용하였다. Momentum, Turbulent Kinetic Energy 그리고 Reynolds Stresses는 Quick이 적용되었다. RSM 모델에 사용된 상수는 다음과 같다.

- Reynolds Stress Model : $C_{mu} = 0.09$, $C_{1-\epsilon} = 1.44$, $C_{2-\epsilon} = 1.92$, $C_{1-PS} = 1.8$
- $k-\epsilon$ RNG Model : $C_{mu} = 0.0845$, $C_{1-\epsilon} = 1.42$, $C_{2-\epsilon} = 1.68$

보강형 단면의 CFD해석에 이용된 단면의 Scale은 1:1이며 Grid는 총 352,000개로 구성되어 있다. 복잡한 기하학적 형상의 주위의 흐름을 나타내기 위하여 Coupling Unstructured Mesh와 Structured Mesh가 동시에 적용되었다.

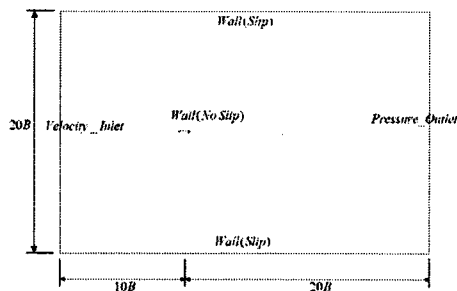


그림 2. 보강형 단면의 CFD해석 영역

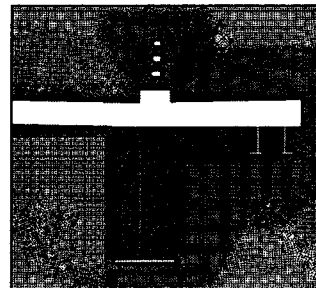


그림 3. 보강형 단면의 Grid

Structured Mesh는 벽면에 Wall Function의 변함없는 적용을 확보하기 위함이다. 보통 y^* 로 평가되는 벽면의 Wall에 인접한 Cell로부터 떨어진 거리는 Log 법칙이 적용될 수 있는 범위인 $30 < y^* < 100$ 를 만족하도록 mesh를 구성하였다. 보강형 단면의 y^* 의 평균값은 42.76이다. 유동장 역의 크기는 Grid Independence Test를 통하여 $30B \times 20B$ 로 결정하였다. 경계조건은 그림 2와 같이 입구부에 Velocity Inlet이 적용되었고 출구부는 Pressure -Outlet이 적용되었다. 위아래 경계면은 Specified Shear의 Shear Condition을 적용하였고 보강형 단면의 벽면은 No Slip 조건으로 처리하였다. 보강형 단면 주위의 Grid를 그림 3에 나타내었다. 풍속은 8m/s에 대하여 수행하였으며 이때의 Reynolds 수(Re)는 보강형 단면의 폭($B=25.9m$)을 기준으로 1.4×10^7 이다. 영각은 $-9^\circ, -6^\circ, -3^\circ, 0^\circ, 3^\circ, 6^\circ, 9^\circ$ 가 고려되었으며 각각의 경우에 대하여 보강형 단면을 회전중심을 중심으로 회전하여 모델링 하였다.

3. 수치해석 결과 및 와류진동 검토

3.1 CFD해석 결과

그림 4에는 수치해석에 의해 산출된 보강형 단면 공기력계수의 시간이력을 영각별로 나타내었다. 공기력계수는 초기의 불안정 변동 시간대를 제외하고, 안정된 수렴을 이루는 구간의 값을 평균하여 구하였다. 표 1에 영각별 공기력계수와 양력 및 모멘트계수의 기울기를 나타내었으며 공기력계수는 평균값과 RMS값에 대하여 나타내었다.

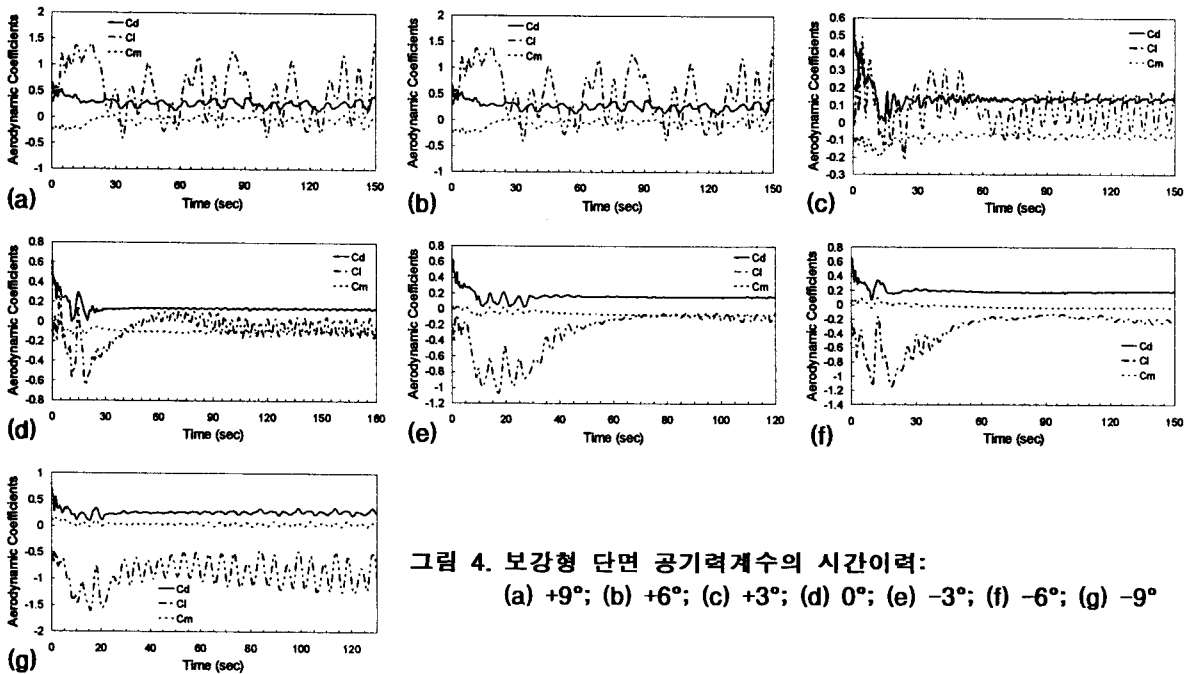


그림 4. 보강형 단면 공기력계수의 시간이력:
(a) $+9^\circ$; (b) $+6^\circ$; (c) $+3^\circ$; (d) 0° ; (e) -3° ; (f) -6° ; (g) -9°

표 1. 보강형 단면의 공기력계수 및 기울기(1/rad)

영각($^\circ$)	항력계수(C_d)		양력계수(C_l)		모멘트계수(C_m)		$\frac{dC_l}{d\alpha}$ ($-3^\circ \sim +3^\circ$)	$\frac{dC_m}{d\alpha}$ ($-3^\circ \sim +3^\circ$)
	평균값	RMS	평균값	RMS	평균값	RMS		
+9	0.280	0.05831	0.510	0.41538	0.065	0.05693	7.009	0.497
+6	0.181	0.04570	0.215	0.30814	0.070	0.04096		
+3	0.139	0.00809	0.080	0.07867	0.080	0.01230		
0	0.143	0.00532	-0.074	0.06200	0.094	0.01005		
-3	0.163	0.00390	-0.287	0.03417	0.054	0.00480		
-6	0.192	0.00265	-0.296	0.0226	0.023	0.00245		
-9	0.265	0.02999	-0.846	0.23224	-0.040	0.02902		

그림 5에서는 CFD해석에 의한 공기력계수를 풍동실험(이학은 외, 2006)에 의해 산출된 공기력계수와 비교하였다. CFD해석에 의해 산출된 항력계수의 경우 풍동실험의 결과보다 최대 15%의 차이를 나타내며 대체적으로 과소평가 되었다. 풍동 실험 결과와 비교해볼 때 양력계수의 값이 다소의 차이를 나타내지만 전반적으로 유사한 경향을 확인할 수 있었다. 그림 6은 CFD 해석에 의해 산출된 영각 0°에서의 보강형 단면 표면에 작용하는 정압계수 (Static Pressure Coefficient, Cp)를 나타내었다. 유선형이 아닌 물체 (Bluff Body) 주위의 압력 분포는 박리된 유동(Separated Flow)의 재부착(Reattachment)에 매우 큰 영향을 미친다. 그림 7에는 보강형 단면주위에 발생하는 시간별 와도(Vorticity)를 영각 0°에 대하여 대표적으로 나타내었다.

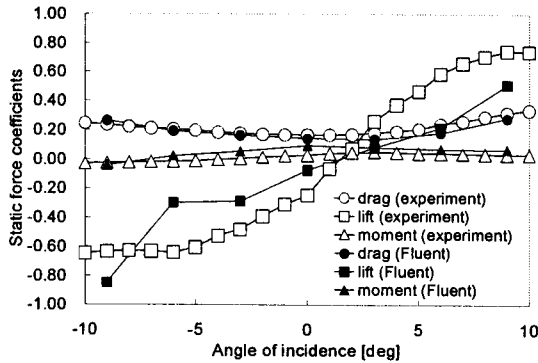


그림 5. 보강형 단면 공기력계수의 비교

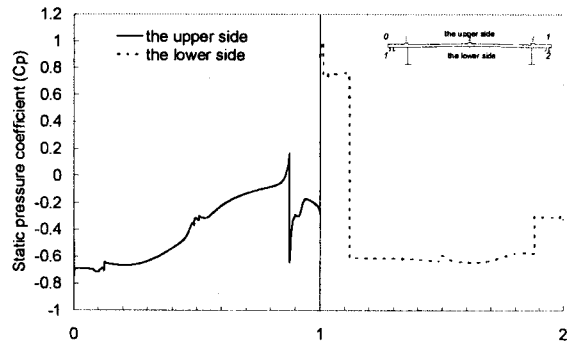


그림 6. 보강형 단면의 Cp분포

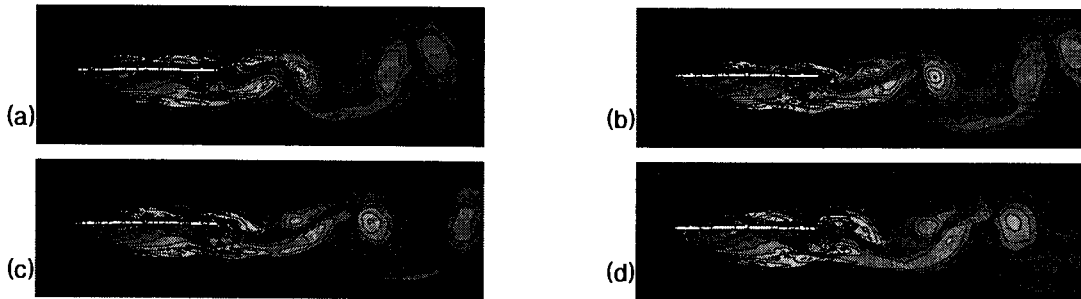


그림 7. 플레이트거더 단면주위의 와도(Vorticity) 분포, 영각 0°:
(a) t=176sec; (b) t=177sec; (c) t=178sec; (d) t=179sec; (d) t=180sec

3.2 풍하중 산정

CFD 해석에 의하여 결정된 항력계수를 통하여 산출된 보강형의 풍하중을 풍동실험에 의해 결정된 항력계수를 통한 보강형의 풍하중과 도로교설계기준·해설(2003)에 제시된 풍하중과 비교 검토하였다. 도로교 설계기준에서는 거스트 응답계수(G)를 해상풍을 산정하여 약 1.9를 표준으로 하고 있다. 설계기준 풍속 $V_d=40m/s$ 를 적용하면, 풍하중은 표 5와 같이 계산된다. 본 수치해석 결과 계산된 풍하중은 $703.38 kgf/m$ 로 도로교설계기준의 식에 의해 계산된 $988.40 kgf/m$ 보다 작았다.

표 2. 설계 풍하중 (B=25.9m, D=3.766m 기준)

구분	풍하중 $p(kgf/m)$	산출근거
수치해석	703.38	$C_d=0.143$
풍동실험	819.35	$C_d=0.1665$
도로교설계기준·해설(2003)	988.40	$p=(400-20(B/D))D$

3.3 와류진동 검토

CFD 해석 결과를 토대로 하여 와류진동에 대한 발생풍속을 검토하였다. 와류진동에 대한 안정성 검토는 수치해석 결과를 바탕으로 검토하였으며 보강형 단면의 대표크기는 바람방향에 수직거리로서 3.766m (3.366m+0.4m)를 고려하였다. CFD해석을 통해 얻은 시간이력을 주파수영역으로의 변환(FFT)을 통해 와류방출 주파수를 산정하였다. 산정된 와류방출 주파수를 통해 스트로할 수를 계산하였으며 영각에 따른 스트로할 수는 그림 9와 같다. 그림 8로부터 동일한 레이놀즈 수($Re=1.4 \times 10^7$) 조건에서 풍각에 따른 구조물 후면의 와류방출 주파수가 변화됨을 확인하였으며, 검토 대상교량의 경우 영각 +3도에서 최대 와류발생을 보였다. 계산된 스트로할 수를 통해 와류진동의 발생풍속을 예측하면 그림 9와 같으며 풍동실험의 동적응답 결과와 비교적 잘 일치하였다.

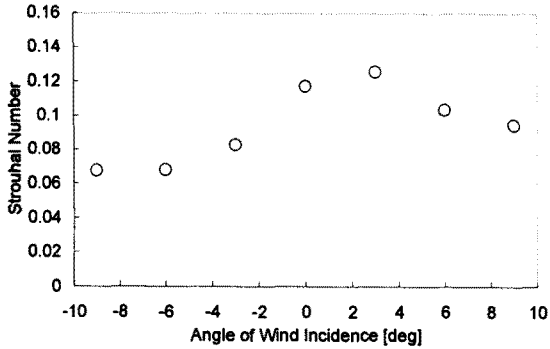


그림 8. 영각에 따른 스트로할 수

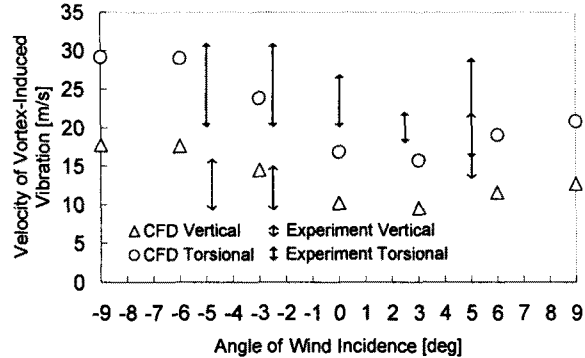


그림 9. 와류진동 발생풍속 비교

4. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. CFD해석에 의해 산출된 공기력계수는 풍동실험과 비교하여 과소평가되는 경향을 보였다. 특히 항력계수의 경우 풍동실험의 결과보다 최대 15%의 차이를 보였으며, 이에대한 추가적인 연구가 필요하다.
2. 전산수치해석을 통해 예측된 항력계수(C_d)를 통하여 검토 대상 단면의 풍하중을 산정하였으며, 풍동실험 및 도로교설계기준과 비교·검토하였다. 풍동실험을 기준으로 전산수치해석을 이용한 산정방법은 약 14% 과소평가하였으며 반면 도로교 설계기준의 경우 20% 과대평가하고 있다.
3. 스트로할 수를 이용하여 와류진동의 발생풍속을 예측한 결과, 풍동실험의 동적응답 결과와 비교적 잘 일치하였다.

참고문헌

1. 이학은 외 6명, "여수국가산단 진입도로 개설공사 제1공구(T/K) 기본설계 용역중 교량 안정성검토 연구보고서", 고려대학교 BK21 건설산업 글로벌리더 양성사업단, 2006.
2. FLUENT Inc. (1995), FLUENT Theory Manual.
3. L. Bruno, S. Khris, J. Marcillat, "Numerical Simulation of Section Details and Partial Streamlining on the Aerodynamics of Bridge Decks", Win and Structures, Vol. 4, No. 4, 2001, pp.315-332.
4. Nakayama, T., Nezu, I., "Numerical Simulation of Turbulence Structures Near the Free Surface by Using Reynolds Stress Model", Journal of construction management and engineering, no.670, 2001, pp.13-24.
6. S.S. Lee, H.E. Lee, J.Y. Cho et al. (2005) Computational and experimental investigation of wind load on bridge with split decks on single pylon, Proceedings of 10th Americas Conference on Wind Engineering, Louisiana, USA, 300-303.
7. Y.M Kim, M.C. Kim, H.E. LEE (2003) Preliminary Design for a p-Type Girder Bridge Regarding Wind Resistance, International Civil Engineering Conference on Sustainable Development in the 21st Century, Nairobi, Kenya.