

전산유체역학 해석에 의한 교량 단면의 공력 특성값 추정

홍영길

한림성심대학교 토목과

(2012. 10. 29. 접수 / 2013. 1. 9. 채택)

Prediction of Aerodynamic Coefficients of Bridges Using Computational Fluid Dynamics

Young-Kil Hong

Department of Civil Engineering, Hallym Polytechnic University

(Received October 29, 2012 / Accepted January 9, 2013)

Abstract : Aerodynamic characteristics of cross section shape is an important parameter for the wind response and structural stability of long span bridges. Numerical simulation methods have been introduced to estimate the aerodynamic characteristics for more detailed flow analysis and cost saving in place of existing wind tunnel experiment. In this study, the computational fluid dynamics(CFD) simulation and large eddy simulation(LES) technique were used to estimate lift, drag and moment coefficients of four cross sections. The Strouhal numbers were also determined by the fast Fourier transform of time series of the lift coefficient. The values from simulations and references were in a good agreement with average difference of 16.7% in coefficients and 8.5% in the Strouhal numbers. The success of the simulations is expected to attribute to the practical use of numerical estimation in construction engineering and wind load analysis.

Key Words : aerodynamic coefficient, bridge cross section, computational fluid dynamics, large eddy simulation, strouhal number

1. 서론

20세기 후반부터 건설 기술의 발전과 더불어 장대교량 및 초고층 건물의 건설이 급격히 증가하는 추세이다. 하지만 구조물이 고층화 및 장대화가 될수록 구조물의 고유진동수는 작아지며 이에 따라 상대적으로 내진성보다는 내풍성에 의해 구조물의 안정성이 좌우되는 경향이 많다. 특히 교량 분야에서는 1940년 853 m 길이의 Tacoma 현수교가 바람에 의해 붕괴되면서 교량의 단면이 갖는 공기역학적 특성과 그에 따른 안정성에 관심을 기울이고 있다¹⁾.

교량에 작용하는 공기력은 정적 공기력과 동적 공기력으로 구분되는데, 정적 공기력에는 바람에 의해 교량이 받는 항력, 양력 및 피칭모멘트가 있다. 이들은 단면의 형상과 바람의 입사각 등에 따라 변화하여 설계에 반영된다. 동적 공기력은 교량의 형상 뿐만 아니라 교량의 고유진동수 등의 동적 특성과 교량의 내부 또는 배후에서 발생하는 와류의 상호작용에 의하여 교량의 거동에 영향을 미치며 안정성을 저해하게 된다^{2,3)}. 따라서 교량 주위에서 발생하는 유동장의 분리, 회전, 재부착 등의 와류 현상을 이해하는 것이 중요하다³⁾.

교량의 공기역학적 특성을 측정하기 위한 방법으로는 크게 실험적 방법과 수치해석적 방법이 있다. 현재까지 실험적 방법으로서 축소 모형을 이용한 풍동 실험이 가장 활발

히 사용되고 있으나, 모형 가공 및 정밀 측정을 위해 가격이 비싼 단점이 있다. 이에 수치해석적 방법은 시간과 비용을 줄이고 복잡한 와류 현상에 대한 가시적이면서 정확한 해석이 가능한 장점이 있다. 하지만 수치해석 결과에 대한 신뢰성은 지속적으로 제고해나가야 할 과제이다¹⁾. 이에 따라 현재까지 수치해석에 의한 방법은 교량의 공기역학적 특성을 사전에 평가하고 교량 형태를 개선하는데 사용될 뿐 최종적이고 실증적인 평가는 풍동실험으로 이루어지고 있는 것이 현실이다⁴⁾. 하지만 경제적인 교량 설계와 지속적인 건설 기술의 발전을 위해서는 수치해석적 접근의 필요성이 강조되고 있으며, 교량의 공기역학적 특성을 예측하고자 수치해석적 기법들이 개발되고 시험되고 있으며 대표적으로 전산유체역학(CFD, computational fluid dynamics) 시뮬레이션이 주로 사용되고 있다⁵⁾.

CFD는 Navier-Stokes 방정식을 유한 격자 내에서 근사적으로 푸는 해석 기법으로 discrete vortex method(DVM) 등과의 결합을 통한 다양한 해석 기법이 시험되어 왔다^{5,7)}. 최근에는 교량과 같은 둔각 물체(bluff body)에서 방출되는 다양한 형태의 와류의 시간별 변동을 정확히 추적하기 위하여 large eddy simulation(LES) 기법이 사용되고 있다. LES는 1963년에 제안되었으나⁹⁾ 많은 계산량과 정교한 격자를 필요로 하였으므로, 컴퓨터의 계산 성능이 크게 향상된 오늘날에 더욱 활발히 사용되고 있다. 기존에 널리 사용되

[†]Corresponding Author: Young-Kil Hong, Tel : +82-33-240-9265, E-mail : geo@hsc.ac.kr
Department of Civil Engineering, Hallym Polytechnic University, 790, Janghal-Ri, Chuncheon, Gangwon-do 200-711, Korea

어 온 Reynolds averaged Navier-Stokes 해석과 비교할 때, 와류의 동적 특성을 모의하는데 더 적합한 것으로 알려져 있다⁸⁾. 하지만 이러한 수치해석적 방법들은 아직 해석 결과에 대한 검증 연구가 부족한 실정이며, 이에 따라 실제의 바람과 모형으로 실험하는 풍동실험에 비하여 충분한 신뢰성을 주지 못하고 있다. 따라서 수치해석적 방법의 신뢰성을 높이기 위한 지속적인 연구와 검증이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 LES 기법에 의한 CFD 시뮬레이션을 활용하여 교량의 공기역학적 특성을 추정하였다. 공력 특성값이 충분히 밝혀진 교량 단면들을 대상으로 CFD에 의해 추정값이 충분한 신뢰성을 갖는지를 평가하였으며, 또한 교량 주위의 와류 변화를 분석하였다. 본 연구의 결과를 통해 교량의 내풍 설계 단계에서 CFD 해석의 적용 가능성을 고찰하고 지속적인 관련 연구를 장려하는데 도움을 주고자 한다.

2. 연구 재료 및 방법

2.1. 수치 해석 방법

본 연구에서는⁹⁾ LES 기법을 사용하였다. LES의 지배 방정식은 CFD 해석의 기본 방정식인 Navier-Stokes 방정식의 유속항을 필터링하여 얻어진다. 유동에 의해 생성되는 소용돌이를 에디(eddy)라 하며, 에디의 크기에 따라 직접 해석을 수행할 큰 에디들은 Navier-Stokes 방정식으로 모의하고, 식 (1)과 같이 필터링을 통해 이보다 작은 에디들은 하위 모델로 계산하게 된다. LES에 의해 필터링된 Navier-Stokes 방정식과 유체의 연속방정식의 CFD 해석은 Fluent ver. 6.3에 의해 수행되었으며, 관련된 방정식들을 참고할 수 있다¹⁰⁾.

$$\overline{u_i(x)} = \int G(x, \xi) u(\xi) d\xi \quad (1)$$

여기서, $\overline{u_i}$ 는 필터링 유속, G 는 필터링 함수이며 작은 에디를 결정하기 위하여 격자의 크기를 기준으로 하였다. \vec{x} 와 $\vec{\xi}$ 는 좌표를 나타내는 벡터이다.

교량에 작용하는 바람은 주로 마하수가 0.3 이하인 자연풍이므로 비압축성 유동으로 간주하였으며, 시간에 따른 와류 모의를 위하여 비정상 상태로 해석하였다. 압력-속도 관계는 PISO 알고리즘을 사용하였으며, 압력과 운동량은 각각 PRESTO 알고리즘과 bounded central differencing 알고리즘으로 차분하였다¹⁰⁾.

2.2. 교량 단면 및 공력 특성값

다양한 교량 단면들 중에서 실험적인 방법과 수치해석적 방법들을 이용한 연구들에서 널리 사용된 4개의 교량 단면을 선택하여 본 연구에 활용하였으며 형상은 Fig. 1과 같다. H-section은 초기 Tacoma 다리를 단순화한 형상이며, R-section은 가장 기본적인 직사각형 형상이다. P-section은 R-section에서 앞뒤의 가장자리를 뾰족하게 변형한 형태이다. GBE 단면은 덴마크의 Great Belt East 현수교에서 사

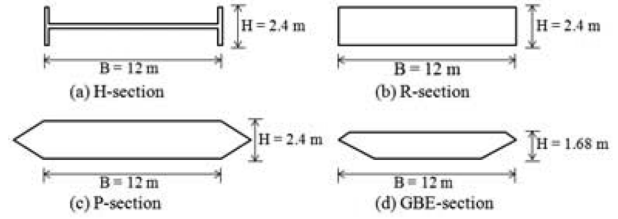


Fig. 1. Different cross section shapes of bridge decks used in this study.

용된 단면으로 근래의 검증 연구들에서 사용된 바 있다⁵⁾.

각 교량 단면들의 공력 특성값들은 몇몇 연구들에서 추정되었으며 그 값들은 Table 1에 나타나 있다. 여기서 무차원 항력계수(C_D), 양력계수(C_L), 모멘트계수(C_M)와 Strouhal 수(St)는 각각 식 (2)와 같이 계산된다.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 B} \quad C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 B}$$

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho U^2 B} \quad St = \frac{fH}{U} \quad (2)$$

여기서 D 와 L 은 각각 단면에 수평과 수직으로 작용하는 항력과 양력이고 M 은 유동에 의해 단면에 작용하는 모멘트를 나타내며, 이 힘들은 풍동 실험을 통해 실측되거나 수치 해석에 의해 산정된다. ρ 는 공기의 밀도, U 는 바람의 유속, B 는 단면의 폭, H 는 단면의 높이, f 는 와류진동이 나타나는 주파수를 나타낸다.

2.3. 시뮬레이션 해석 방법

기류의 해석 조건은 비정상, 비압축성기류, 일정물성치의 특성을 갖는 유동으로 가정하였다. LES에 의한 기류 해석은 유한체적법에 기초한 FLUENT package(Ver. 6.3, Fluent Inc.)¹⁰⁾로 계산하였으며, 계산 영역과 격자 설계는 GAMBIT(Ver. 2.4, Fluent Inc.)¹⁰⁾로 수행하였다. 전체 계산 영역은 Fig. 2(left)와 같이 150 m(W) × 100 m(H) 크기로 하여 교량 단면의 중심으로부터 풍상측으로 50 m, 풍하측으로 100m의 2차원 유동 영역을 만들어주었다. 격자는 수치해의 안정성을 높이면서 격자 수를 절약하기 위하여 사각형의 정렬격자로 설계하였으며, 교량으로부터 외부로 격자의 크기가 점차 커지도록 설계하였다. 대신 결과의 정확도를 높이기 위하여 교량을 둘러싼 20 m(W) × 10 m (H)의 소영역을 만들어 Fig. 2(right)와 같이 내부에는 격자 크기의 변화없이 0.1m 이내의 조밀한 사각형 비정렬격자로 설계하였다. 총 격자수는 교량 형태에 따라 차이는 있지만 62,443~65,755개이며, 비정상 상태의 장시간 모의에 적절한 규모로 설계되었다.

계산 영역의 좌측은 유동 입구로 설정하여 10 m/s의 유속을 설정하였으며, 일반 대기의 난류 상태와 유사하도록 난류 강도 10%와 난류 점성비 10의 값으로 변동 풍속이 발생하도록 spectral synthesizer 기법¹⁰⁾으로 난류를 형성하였다. 영역의 우측은 유동 출구로 계기압 0 pa의 고정압력

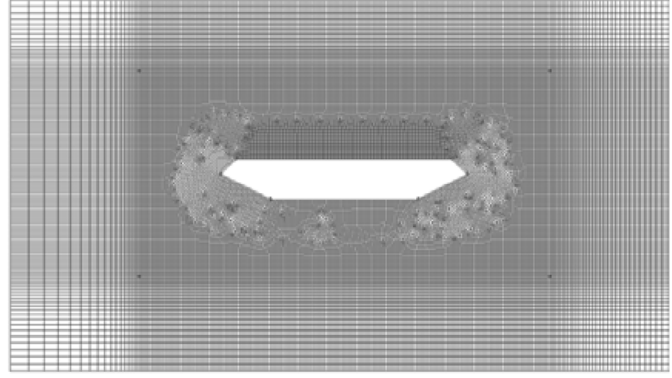
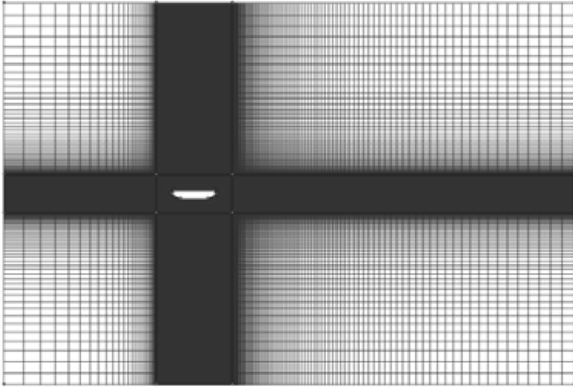


Fig. 2. Mesh distributions of the whole computational domain(left) and sub-domain near the cross section(right).

Table 1. Aerodynamic characteristics obtained from references for four cross sections

Shape	C_D	C_L	C_M	S_t
H-section	0.30 ¹⁾	0.57 ¹⁾	0.115 ¹⁾	0.11 ^{1,11,14)}
	0.28 ^{11-12,14)}	0.37 ¹⁴⁾		0.114 ¹²⁾
	0.24, 0.30 ¹³⁾			0.115 ¹³⁾
R-section	0.20 ¹⁾	0.23 ¹⁾	0.035 ¹⁾	0.11 ¹⁾
	0.23 ^{11,14)}	0.24 ¹⁴⁾		0.09 ^{11,14)}
P-section	0.16 ¹⁾	0.04 ¹⁾	0.010 ¹⁾	0.17 ¹⁾
	0.11 ^{11,14)}	0.17 ¹⁴⁾		0.13 ^{11,14)}
GBE-section	0.061 ¹²⁾	0.08-0.1 ¹⁵⁾	0.028 ¹⁴⁾	0.168, 0.100 ¹²⁾
	0.077 ¹³⁾	0.067 ¹⁴⁾		0.158, 0.109 ¹³⁾
	0.081 ¹⁴⁾			

조건으로 설정하였다. 교량의 벽면은 점착조건(no slip condition)으로 가정하였다. 공기의 밀도는 1.225 kg/m^3 , 점성은 $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$ 으로 일정하다고 가정하였다.

비정상상태의 시간 간격은 0.02초로 설정하였으며, 총 60,000회 연산하여 실제시간으로 1,200초 동안의 교량 단면의 항력, 양력, 모멘트 변화를 모의하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 전산유체역학 시뮬레이션을 이용하여 네 가지 교량 단면을 지나는 바람의 유동과 그에 따른 교량의 역학적 반응을 모의하였다. 이에 따라 교량의 공력 특성값들을 추정하여 기존에 제시된 문헌값들과 비교 고찰하였으며, 이러한 공력 특성값들의 추정을 위한 전산유체 해석적 방법을 살펴보았다.

3.1. 교량 단면 주위의 와류 모의

2차원 와도는 $\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right)$ 로 계산되며, 이의 분포를 나타낸 Fig. 3에 따르면 교량 후부에서 와류(vortex)의 주기적인 발달 및 감소가 나타나고 있다. Fig. 3은 유동이 충분히 발달된 1,200초에서의 와도분포를 나타낸 그림들이다. 와류의 세기는 유동 상류의 정체영역 부근, 교량상부, 하부의 형상 변화부 및 교량의 하류방향 끝에서 크게 나타났으며, 이는 형상 저항에 의한 유동의 박리에 의한 것이다. 교량의 상단과 하단에서 생성된 음과 양의 와도는

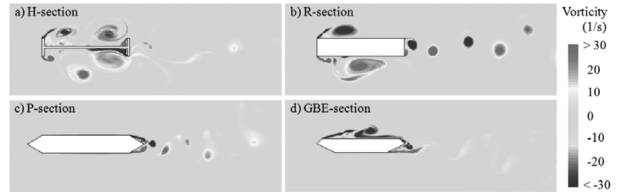


Fig. 3. Vorticity distributions at 1,200 seconds for four cross sections: a) H-section, b) R-section, c) P-section, and d) GBE-section.

동근형태의 와류를 형성하며 후류로 방출되었다. 서로 부호가 다른 와류의 쌍들은 구조물 후면에 vortex street를 형성하였다. 교량 단면의 벽면에서 형성되는 와류의 크기는 H-section과 R-section에서 더 크게 나타났으며, P-section과 GBE-section에서는 표면에서의 와류보다는 후류에서의 와류가 더 크게 나타났다. 이는 바람을 맞는 풍상측 단면 형상이 H-section과 R-section은 편평한데 반해 P-section과 GBE-section은 뾰족하기 때문이다. 앞선 두 단면에서는 바람이 풍향에 수직인 벽면에 부딪히면서 모서리 부근에서 유동 박리에 의해 강한 와류가 형성되는 반면, 나머지 두 단면에서는 바람이 벽면을 따라 흐르며 박리 현상이 적게 나타나게 된다.

3.2. 교량 단면의 공력 특성값 추정 및 고찰

각 교량 표면에서의 항력계수, 양력계수 및 모멘트계수를 모니터링하였으며, 이 중 임의의 구간 600초에서 1,200초에 해당하는 값들은 Fig. 4에 나타나 있다. 세 계수들의 시간이력을 살펴보면, 다소 복잡하지만 특정 주기를 중심으로 규칙성 있게 진동한다. 전반적으로 양력계수와 모멘트계수는 매우 작은 진폭 내에서 진동하는 반면 양력계수는 비교적 큰 폭으로 진동하는데, 네 가지 단면 중 H-section과 R-section에서 ± 1.5 내외로 크게 나타났다. 이는 H-section과 R-section의 표면에서 나타나는 강한 와류와 밀접한 관련이 있을 것이다.

시뮬레이션에 의해 모의된 항력계수와 양력계수, 모멘트계수의 시간이력으로부터 평균값을 계산하면 Table 2와 같다. 각 계수들의 시간평균계산 시, 초기 100초까지의 공기력은 정상상태에 도달하기 이전으로 간주하여 계산에서 제외하였으며, 이후 1,200초까지의 이력을 평균화하였

Table 2. Aerodynamic characteristics obtained from CFD simulations for four cross sections

Shape	H-section	R-section	P-section	GBE-section
C_L	0.255	0.265	0.055	0.055
C_D	0.226	0.203	0.090	0.064
C_M	0.117	0.036	0.014	0.035

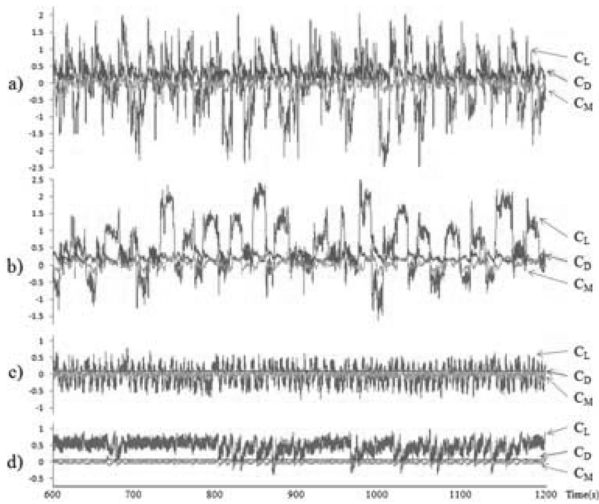


Fig. 4. Simulated time traces of drag coefficient(C_D), lift coefficient(C_L) and moment coefficient(C_M) for four cross sections: a) H-section, b) R-section, c) P-section, and d) GBE-section.

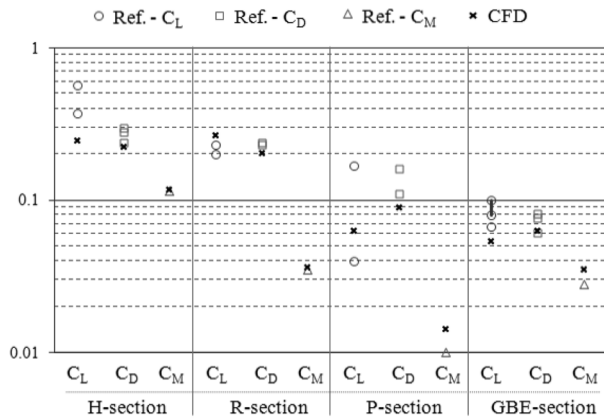


Fig. 5. Comparisons of aerodynamic characteristics between references(Ref.) in Table 1 and simulations(CFD).

다. 양력계수의 경우, 시간에 따른 진동의 진폭이 컸던 H-section과 R-section은 각각 0.25와 0.27로 P-section과 GBE-section에 비하여 약 4~5배 더 큰 값을 나타냈으며, 항력계수 또한 H-section과 R-section이 0.2이상의 값을 보여 다른 단면들에 비하여 약 2~4배 더 크게 나타났다. 모멘트계수는 H-section이 0.12의 값을 보여 다른 단면들에 비하여 3~12배 더 크게 나타났다.

시뮬레이션에 의한 추정된 각 계수들을 Table 1에 나타난 문헌들에서 제시한 값들과 비교하면 Fig. 5와 같다. 세 가지 계수들에 대하여 시뮬레이션에 의해 추정된 양력계수, 항력계수, 모멘트계수는 문헌값들 중 본 연구 결과와 유

사한 값과 비교하여 각각 24.5, 11.6, 14.0%의 차이를 보여 항력계수에서 가장 유사한 값을 나타냈다. 반면 양력계수는 가장 큰 차이를 보였는데, 이는 Fig. 4와 같이 양력계수 값이 가장 변동이 크고 심하기 때문으로 판단된다. 네 가지 단면들에 대해서는 H-section, R-section, P-section, GBE-section에 대하여 각각 9.9%, 10.3%, 30.0%, 16.5%의 차이를 보였다. 단면 표면에서의 와류 발생이 심한 H-section과 R-section에서 오히려 비교적 작은 차이가 나타났으나, 실제로는 P-section과 GEB-section에서는 세 계수들의 값 차이가 매우 작은 수준이며 평균적인 차이는 각각 0.016과 0.008에 불과하므로 시뮬레이션 결과가 문헌값들과 충분히 유사하다고 판단할 수 있다. 종합적으로 고려하면, 네 가지 교량 단면들의 세 가지 공력 특성값들에 대하여 평균적으로 약 16.7%의 차이를 보였으며, 실제 계수들의 차이는 평균적으로 0.017 정도에 불과하였다. 문헌들 간의 값 차이가 C_D 는 최대 0.06, C_L 은 0.2에 달하는 것과 비교할 때, 시뮬레이션에 의한 추정값들은 문헌들의 값들과 상당히 유사하다고 판단할 수 있다.

3.3. Strouhal 수 추정 및 고찰

단면의 모서리에서 발생하는 다양한 와류방출과 비선형적 변동으로 인해 복잡한 주기의 진동현상이 나타나므로 Strouhal 수를 명확하게 정의하기 어렵지만, 여기서는 양력계수의 고속푸리에변환 (FFT)을 이용하여 주요 주파수들을 해석하였다. 양력 계수의 FFT 신호 중 가장 높은 피크가 나타나는 주파수를 기준으로 Strouhal 수를 정의하였다.

양력계수의 시간이력을 FFT로 분석하면 주파수에 따른 응답 스펙트럼을 얻을 수 있다. 모든 단면들에 대하여 전반적으로 0.1 Hz 이하의 낮은 주파수에서 높은 신호가 나타나고 있는데, 여기에 주파수를 곱하면 Fig. 6과 같이 낮은 주파수의 신호를 줄이고 0.1~1 Hz 대의 주파수의 피크를 쉽게 구분할 수 있다. Fig. 6에 따르면, H-section은 명확한 피크가 보이지는 않지만 나머지 세 단면들에서는 피크가 쉽게 구분되는 것으로 나타났다. 네 단면들의 피크는 각각 H-section, R-section, P-section, GBE-section에 대하여 0.38, 0.415, 0.685, 0.645 Hz로 확인되었다. 이에 따라 네 단면들의 Strouhal 수는 각각 0.091, 0.100, 0.164, 0.108로 계산되었다. 시뮬레이션으로부터 추정된 Strouhal 수 값들은 Table 1의 문헌들에서 제시된 유사한 값들(각각 0.11, 0.09, 0.17, 0.109)과 비교할 때, 각각 20.6, 9.6, 3.4, 0.6% 차이를 보이고 있으며 평균적으로 8.5%의 차이를 보였다. 실제적인 Strouhal 수의 차이 또한 약 0.009 정도로 문헌들에서 제시된 여러 값들의 차이보다 작게 나타나 본 연구의 결과가 문헌들과 유사하다고 판단할 수 있다. 단, H-section에서는 비교적 큰 차이가 났는데, Fig. 6의 a)에서 피크가 명확히 나타나지 않았으므로 와류진동이 나타나는 주파수를 추정하는데 한계가 있었기 때문으로 판단된다. 전반적으로 전산유체역학 시뮬레이션에 의해 추정된 공력 특성값들은 풍동실험이나 다른 여타 시뮬레이션에서 제시된 공력 특성값들과 상당히 유사한 값을 도출하는

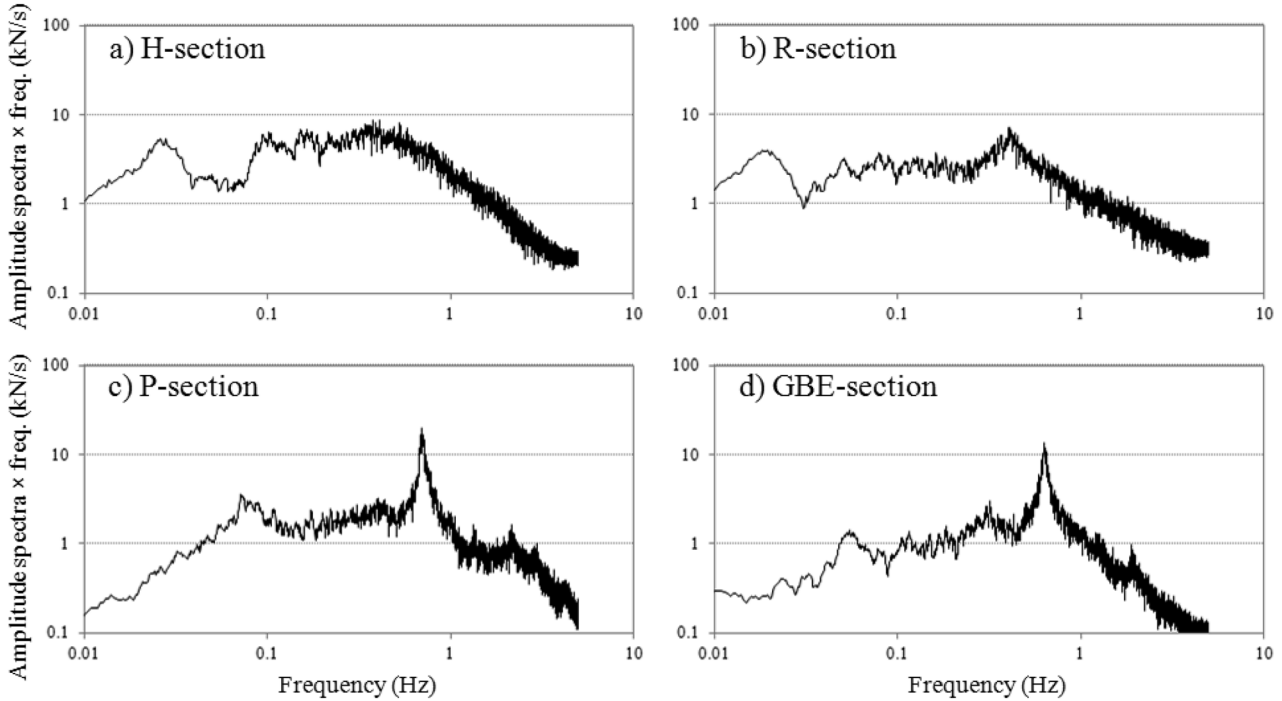


Fig. 6. Amplitude spectra of lift forces computed by a fast fourier transform for four cross sections.

것으로 나타났다. 교량 단면에 가해지는 힘의 변화는 교량 주위에서 생겨나는 수많은 에디들에 의해 형성되는데, 본 연구에서는 격자의 크기를 약 0.1 m 이내로 설계하여 구현 가능한 에디의 크기도 유사한 수준으로 제한하였음에도 다른 참조 값들과 유사한 값을 도출할 수 있었다. 물론 교량의 단면이 복잡해 지고 더 작은 수준의 에디가 중요한 역할을 하게 될 경우, 더 작은 크기의 격자를 사용하여 시뮬레이션 결과의 정확도를 높일 필요가 있을 것이다. 현재 이러한 공력 특성값들은 대부분 풍동실험을 통하여 측정되고 있으나, 풍동실험은 풍동이라는 대형 기반 시설이 필요하고, 구조물의 축소 모형을 정교하게 제작하여야 하는 많은 시간과 노력, 그리고 비용을 필요로 한다. 하지만 이러한 시뮬레이션에 의한 공력 특성값들의 추정은 이러한 모든 비용들을 절감시킬 수 있으며, 보다 정교한 공기 유동학적 해석을 수반할 수 있는 큰 장점이 있다. 물론 시뮬레이션에 의한 해석값이 충분한 신뢰도를 갖기 위하여 지속적인 노력이 필요할 것이며, 본 연구가 이러한 노력에 기여할 수 있기를 기대한다.

4. 결론

본 연구에서는 전산유체역학 시뮬레이션을 활용하여 교량의 공기역학적 특성값들을 추정하고, 기존에 제시된 문헌값들과 비교 고찰하였다. LES 기법에 의해 바람의 유동과 교량 주위의 와류 변화를 모의하고 네 가지 교량 단면들이 받는 양력, 항력, 모멘트들의 계수와 Strouhal 수를 추정하였다. 본 연구의 주요 결과들을 정리하면 다음과 같다.

1) 교량 단면의 바람을 맞는 풍상측 형상이 편평한 H-section과 R-section에서는 뾰족한 형상의 P-section과 GBE-section에 비하여 모서리 부근에서의 유동 박리에 의한 강한 와류가 크게 형성되었으며, 이에 따라 양력 계수의 변동이 비교적 크게 나타났다.

2) 네 가지 단면들과 각 단면의 양력계수, 항력계수, 모멘트계수들에 대하여 전산유체역학 시뮬레이션에 의해 추정된 값들은 문헌들에서 제시된 값과 비교하여 전체적으로 16.7%의 차이를 보였으며 실제 계수 값의 차이는 0.017에 불과하여 충분히 유사한 결과를 도출하였다고 판단된다.

3) 양력에 대한 FFT 분석 결과, H-section, R-section, P-section, GBE-section은 각각 0.38, 0.415, 0.685, 0.645 Hz에서 가장 높은 신호가 나타났으며, 이로부터 추정된 Strouhal 수는 각각 0.091, 0.100, 0.164, 0.108 로, 문헌들에서 제시된 값들과는 각각 20.6, 9.6, 3.4, 0.6% 차이를 보여 전체적으로 상당히 유사한 결과를 보였다.

교량의 공기역학적 성능을 추정하는 방법이 건설의 규모나 안전도를 고려하여 쉽게 바뀔수는 없으나, 지속적인 수치해석적 방법의 보완과 정확도 개선을 통해 시뮬레이션에 의한 추정이 가능할 수 있으며 이를 통하여 정밀한 분석과 상당한 비용 절감을 기대할 수 있을 것이다.

References

1) B. Hubner, E. Walhorn and D. Dinkler, "Numerical Investigations to Bridge Aeroelasticity", Proceedings of the Fifth World Congress on Computational Mechanics (WCCM), pp. 1~15, Vienna, Austria, 2002.

- 2) D. G. Kim and H. K. Kim, "Numerical Analysis of the Shear Flow Effect on Unsteady Aerodynamic Forces Acting on an Oscillating Retangular-Section Cylinder", *J. of the Wind Engineering Institute of Korea*, Vol. 11, No. 2, pp. 211~220, 2007.
- 3) D. G. Kim, H. K. Kim and S. H. Lee, "Aerodynamic Characteristics of Bridge Girder Section with Handrails - Case Study of the Mokpo Bridge", *J. of the Wind Engineering Institute of Korea*, Vol. 12, No. 3, pp. 201~209, 2008.
- 4) H. K. Kim and D. K. Kim, "Introduction of Wind Environment Modelling and Wind Resistance Technique (KWERC)", *J. of Korea Water Resource Association*, Vol. 41, No. 9, pp. 93~99, 2008.
- 5) M. Vezza and I. Taylor, "An Overview of Numerical Bridge Deck Aerodynamics", *The QNET-CFD Network Newsletter*, Vol. 2, No. 2, pp. 21~26, 2003.
- 6) Y. R. Cho, J. Y. Cho and H. E. Lee, "Numerical Analysis for the Evaluation of Buffeting Response of a Long Span Bridge in Turbulent Wind Flow", *J. of the Wind Engineering Institute of Korea*, Vol. 10, No. 1, pp. 45~53, 2006.
- 7) P. Ausoni, M. Farhat, Y. A. Bouziad, J. L. Kueny and F. Avellan, "Karman Vortex Shedding in the Wake of a 2D Hydrofoil: Measurement and Numerical Simulation", *Proceedings of the Int. Meeting of WG on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems*, pp. 1~14, Barcelona, Spain, 2006.
- 8) F. Bressan, "Large Eddy Simulation of Turbulence around a Scoured Bridge Abutment", Ph.D dissertation of University of Trieste, Italy, 2010.
- 9) J. Smagorinsky, "General Circulation Experiments with the Primitive Equations", *Monthly Weather Review*, Vol. 93, No. 3, pp. 99~164, 1963.
- 10) Fluent, "Fluent 6.3 Documentation", Fluent Inc., Lebanon, N.H, 2010.
- 11) A. Larsen, "Advances in Aeroelastic Analyses of Suspension and Cable-stayed Bridges", 2nd European & African Conference on Wind Engineering, Genova, 1997.
- 12) A. Larsen and J. H. Walther, "Aeroelastic Analysis of Bridge Girder Sections based on Discrete Vortex Simulations", *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 67&68, pp. 253~265, 1997.
- 13) G. Schewe, "Nonlinear Flow-induced Resonances of an H-shaped Section", *J. of Fluids and Structures*, Vol. 3, No. 4, pp. 327~348, 1989.
- 14) A. Larsen, "Advances in Aeroelastic Analysis of Suspension and Cable-stayed Bridges", *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 74~76, pp. 73~90, 1998.
- 15) J. M. Terres-Nicoli and G. A. Kopp, "Mechanisms of the Vertical Induced Vibration of the Storebelt Bridge", *Proceedings of the 11th Americas Conference on Wind Engineering*, 2009.