

교량 단면의 공기 역학계수 산정에 대한 동적 불안정성 평가

Dynamic Instability Analysis of Bridge Sections using Numerical Computation of Aerodynamic Coefficients

원창희^{1*}, 이주용¹, 이승수¹
충북대학교 토목공학부¹

초 록

본 연구는 전산 유체 해석 프로그램인 EDISON_CFD 해석 결과 산출된 정적공기력계수(양력계수, 항력계수)를 이용하여 교량 단면의 갈로핑(Galloping)에 대한 안정성 평가를 실시하는데 그 목적이 있다. 특히 해상 교량은 장대 교량인데다 높은 풍속까지 견뎌 내야 하므로 내풍 안정성 검토의 중요성이 부각되고 있다. 전산 해석에 사용된 교량은 이순신 대교와 거가 대교의 표준 단면을 사용하였으며, 받음각과 풍속의 변화를 주어 높은 레이놀즈수 영역에서 공기력계수의 변화에 대해 검토하였다.

Key Words : 갈로핑(Galloping), 양력계수(Lift coefficient), 항력계수(Drag coefficient), 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)

1. 서론

최근 들어 교량 구조물은 기술의 발달로 인하여 장대화, 경량화 되어 지고 있다. 장대 교량과 같이 구조적으로 유연한 구조물 설계 시 풍하중이 주하중으로 되어 설계를 지배하는 것이 일반적이다. 1879년 영국 스코틀랜드의 Tay철도교의 낙교사고, 1940년 미국의 Old Tacoma Narrow교의 낙교 사고를 통해 공력학적 안정성에 대한 검토 및 공력 탄성적 불안정에 대한 검토의 중요성이 인식되었다. 바람에 의해 구조물이 나타낼 수 있는 거동은 크게 강제진동(Forced Vibration)과 자발(Self-Excitation)진동으로 분류할 수 있다. 강제진동이란 바람의 시간적 변화특성에 의한 진동현상으로 작용하중이 구조물의 진동과는 무관한 경우이다. 반면 자발진동이란 구조물의 진동을 일으키는 외력이 구조물의 자체진동에 의해 발생 또는 증가하는 경우이며, 구조물의 진동이 사라지면 그 작용력도 없어진다. 강제진동에는 구조물 주변에서 발생하는 바람의 와류(Vortex)에 의한 와류진동(Vortex shedding)과 바람의 시간적 변화특성 혹은 구조물 주변에서의 공기의 흐트러짐에 의해 발생하는 버펫팅(Buffeting) 등이 있다. 자발진동에는 대표적인 현상으로 플러터(Flutter)와 갈로핑(Galloping)이 있고 일부 연구에서는 소용돌이에 의한 진동을 자발진동으로 분류하는 경우도 있다.(1),(2)

구조물의 내풍설계는 풍동실험을 통해 동적, 정적 거동을 예측하는 것이 일반적이나 비용과 시간이 너무 많이 소요되고, 완벽한 상사에 대한 문제와 필요 데이터 추출 방법 등에 따라 편차가 심하다. 이러한 풍동실험을 보완 및 대체하는 기술로서 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)이 있다. 따라서 본 연구에서는 EDISON_CFD를 이용하여 교량의 자발진동 중 갈로핑 현상에 대한 평가를 통해 동적 불안정성을 평가하였다.

2. 본 론

2.1 갤로핑(Galloping)

갤로핑은 교량이 바람에 의해 상하 방향으로 흔들리는 발산 진동을 의미하며, 등속의 층류에서 원형단면이 아닌 경우에 한해 설계풍속이 임계풍속보다 클 때 자주 발생한다. Glauert-Den Hartog은 영각에서 케이블의 공력감쇠비가 음으로 전환되어 전체 감쇠비(net damping)가 음의 값을 가지면 갤로핑이 발생됨을 제시하였다. 교량 구조물의 갤로핑 현상은 플러터 등과 같이 구조물에 직접적인 영향을 주기 때문에 안정성을 평가할 필요가 있다. Glauert-Den Hartog가 제시한 판정기준은 형태가 간단하기 때문에 풍동실험이나 전산유체역학에 의해 정적 공기력 특성이 얻어지는 경우에 갤로핑의 안정성을 평가하는데 자주 이용되고 있다. 정적공기력계수는 양력계수(C_l), 항력계수(C_d), 피칭모멘트계수(C_m)로 나타내어진다. 본 연구에서는 EDISON_CFD를 이용하여 산출된 이순신대교와 거가대교의 정적공기력계수들을 이용하여 갤로핑에 대한 안정성 평가를 실시하였다.

Glauert-Den Hartog가 제시한 조건을 식으로 나타내면 식(1)과 같다.

$$\bar{D} + \frac{d\bar{L}}{d\alpha} < 0 \quad (\text{여기서 } \bar{D} \text{는 항력계수, } \bar{L} \text{는 양력계수, } \alpha \text{는 영각을 나타낸다.}) \quad (1)$$

위 식에서 사용된 양력계수의 도함수는 Fig. 1과 같이 교량의 영각별 양력계수들을 얻어 분석할 수 있다. Glauert-Den Hartog의 판정기준에 따르면, 영각별로 양력 계수들을 구해 변화율을 구한 후 그 값과 항력계수 값을 합한 값이 음의 값을 가지면 갤로핑이 발생하는 것으로 볼 수 있다.

2.2 유동 해석 조건

본 논문은 Table 1과 같은 설계 제원에 대하여 수치해석을 수행하였다. 이순신 대교와 거가 대교의 표준 단면을 사용하였으며, 속도의 변화에 따른 레이놀즈수에 변화를 주었으며, 전체 유동장을 난류로 가정하였다. 전산 해석에 사용된 해석자는 EDISON_CFD에서 2차원 비압축성 유동의 정렬 격자계 Multi-block용 해석자인 2D_Incomp-2.1_P를 사용하였으며, 지배방정식은 RANS(Reynolds-Averaged Navier -Stokes) 방정식을 사용한 유한체적법 기반으로 난류 모델은 Menter's k-w Shear Stress Transport이다.

2.3 레이놀즈수(Re)

레이놀즈수는 관성력과 점성력의 비로 풍동 실험이나 전산유체역학(CFD) 해석에 있어 가장 중요한 무차원 수 중 하나이다. 레이놀즈수는 전단력과 반비례하기 때문에 낮은 레이놀즈수는 점성 전단력이 상대적으로 크다는 것을 의미하고, 높은 레이놀즈수에서는 점성 전단력이 상대적으로 작다는 것을 의미하며, 유체의 관성 반력에 비해서 점성 저항력은 무시할 수 있는 정도가 된다. 따라서 본 논문에서는 식 (2)를 이용하여 Table1에 제시된 높은 레이놀즈수 영역에서 교량의 동적 불안정성을 평가하였다.

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (2)$$

여기서 μ 는 공기의 점성계수, ρ 는 공기밀도, V 는 풍속, L 은 교량의 특성길이로 이 경우 교량단면의 폭을 이용하였다.

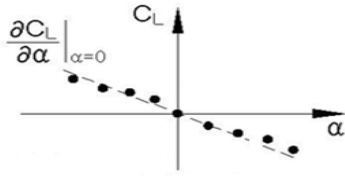


Fig. 1 양각에 따른 양력 계수 변화율

Table. 1 유동 해석 조건

	거가대교		이순신대교	
L	22m		29.1m	
V	10m/s	30m/s	10m/s	30m/s
Re	1.5×10^7	4.5×10^7	2×10^7	6×10^7
AOA	$-5^\circ \sim 8^\circ$		$-2^\circ \sim 7^\circ$	
ρ	1.225 kg/m^3			
μ	$1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$			

2.4 격자 모델링 및 경계 조건

이순신 대교와 거가대교의 격자는 Fig. 2와 3의 (a)에서 보이는 것처럼 2차원 격자이며, 계산 결과의 신뢰도가 향상 될 수 있도록 교량 단면 주위로 매우 조밀한 분포의 격자를 생성하였다.

전산 해석에 사용된 경계조건은 Fig. 2와 3의 (b)와 같이 교량 단면의 벽면 조건으로 점착조건 (EDISON_CFD의 Viscous Adiabatic Wall 조건)을 주었고 유동의 입/출구는 Subsonic Inlet/Outlet으로 설정하고, 해석 영역의 위, 아랫면은 Far-Field Boundary Condition으로 설정하였다.

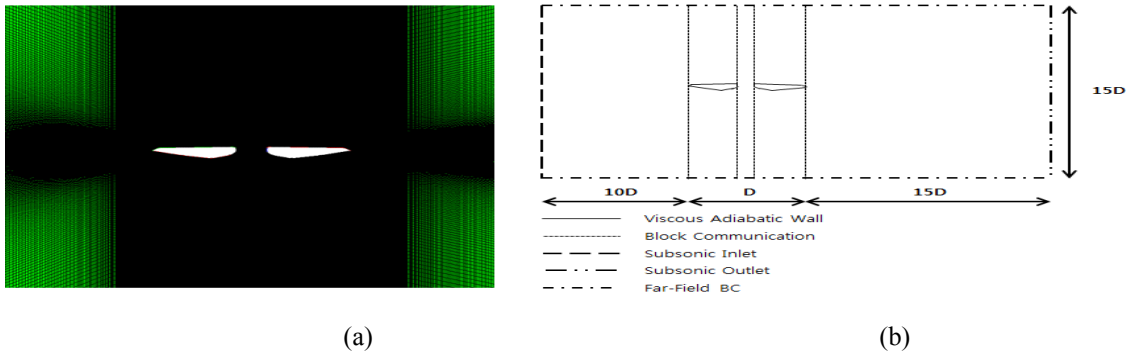


Fig. 2 2차원 격자 형상 및 경계 조건(이순신 대교)

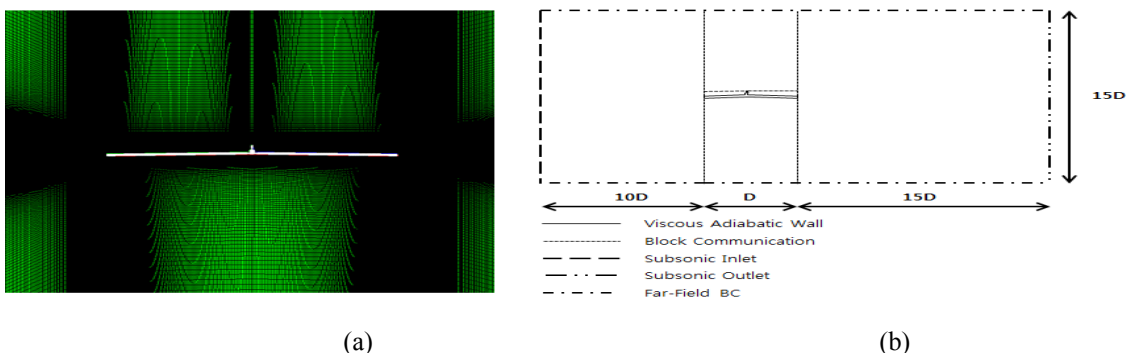


Fig. 3 2차원 격자 형상 및 경계 조건(거가 대교)

2.5 해석자 검증

EDISON_CFD의 신뢰도를 높이기 위하여 이순신 대교의 양력계수와 항력계수를 이승호 등(3)의 풍동 실험 결과와 받음각의 변화($0 \sim 3^\circ$)에 따라 비교하였다. EDISON_CFD 결과 출력되는 양력계수(C_l)와 항력계수(C_d)는 식 (3), (4)과 같다.

$$C_l = \frac{L^*}{\frac{1}{2}\rho_\infty^*(u_\infty^*)^2 l^*} = \frac{L^*}{\frac{1}{2}\frac{\rho_\infty}{\rho_\infty}\left(\frac{u_\infty}{u_\infty}\right)^2 \frac{l'}{l}} = \frac{L^*}{\frac{1}{2}l'} \quad (3)$$

$$C_d = \frac{D^*}{\frac{1}{2}\rho_\infty^*(u_\infty^*)^2 l^*} = \frac{D^*}{\frac{1}{2}\frac{\rho_\infty}{\rho_\infty}\left(\frac{u_\infty}{u_\infty}\right)^2 \frac{l'}{l}} = \frac{D^*}{\frac{1}{2}l'} \quad (4)$$

여기서 ∞ 는 자유류(freestream), * 는 무차원화 변수, l 은 특성길이(characteristic length)를 의미 한다.

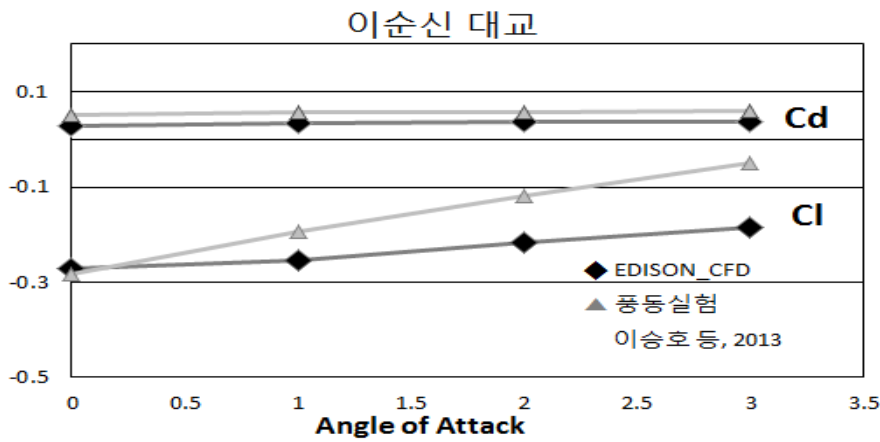


Fig. 4 양력계수 및 항력계수 비교(이순신 대교)

Fig. 4는 이순신 대교의 EDISON_CFD 해석 결과와 이승호 등(3)의 풍동실험에서의 양력계수와 항력 계수를 나타내었다. 해석 검증 결과 항력계수는 받음각의 변화에 따라 거의 일치하는 경향을 나타내었고, 양력계수는 받음각이 증가하면서 점차 증가하는 비슷한 경향을 나타내었다.

2.6 해석 결과

Fig. 5와 6은 거가대교와 이순신대교의 레이놀즈수 변화에 따른 EDISON_CFD 해석 결과 출력되는 양력계수와 항력계수를 나타내었다. 받음각이 증가할수록 양력계수의 값이 점점 증가하는데 이것은 양력 계수 변화율($\frac{d\bar{L}}{d\alpha}$)이 양의 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 또한 속도 변화에 따른 레이놀즈수의 변화에 상관없이 양력계수와 항력계수가 비슷한 경향을 나타내는데 이는 높은 레이놀즈수 영역에서 관성 반력에 대한 ΔP 의 비가 변하지 않기 때문에 C_p 는 일정하게 되어 양력계수와 항력계수도 일정하게 유지되고, 유체의 관성 반력에 비해서 점성 저항력을 무시할 수 있는 이론적 의미와 일치함을 보여준다.

Table 2와 3은 거가대교의 속도변화에 따른 깎로핑 해석 평가를 실시한 결과이다. 거가대교와 이순신 대교 모두 받음각의 변화에 따른 양력계수와 항력계수가 증가하기 때문에 각각의 깎로핑 해석 평가 결과 속도 변화에 관계없이 안정한 것으로 나타났다.

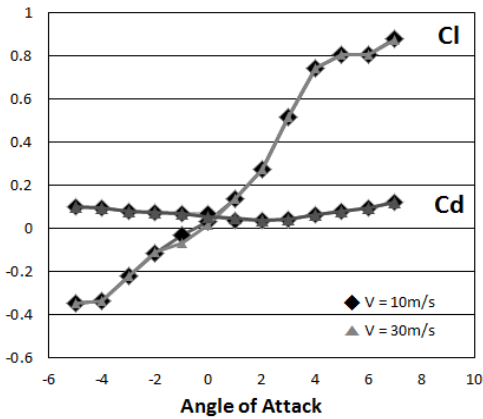


Fig. 5 양력계수 및 항력계수(거가 대교)
V = 10m/s , 30m/s

Table 2 깰로핑 해석 평가(거가 대교)

AOA	V = 10m/s		V = 30m/s	
	$\bar{D} + \frac{d\bar{L}}{d\alpha}$	안정성 평가	$\bar{D} + \frac{d\bar{L}}{d\alpha}$	안정성 평가
-5	0.114341	안정	0.114398	안정
-4	0.211608	안정	0.212945	안정
-3	0.187592	안정	0.192107	안정
-2	0.155191	안정	0.112924	안정
-1	0.102128	안정	0.155787	안정
0	0.139975	안정	0.174755	안정
1	0.178044	안정	0.184734	안정
2	0.276885	안정	0.277542	안정
3	0.273048	안정	0.272057	안정
4	0.127979	안정	0.128489	안정
5	0.081385	안정	0.081385	안정
6	0.167577	안정	0.166195	안정
7	0.06594	안정	0.067287	안정

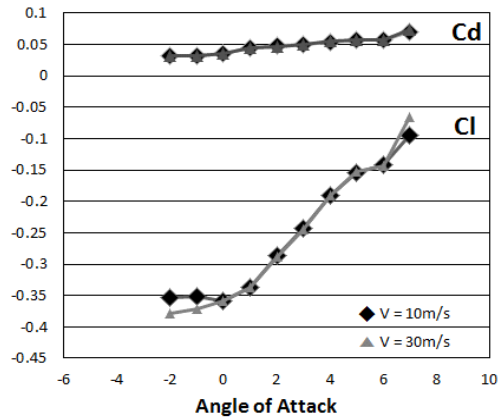


Fig. 6 양력계수 및 항력계수(이순신 대교)
V = 10m/s , 30m/s

Table 3 깰로핑 해석 평가(이순신 대교)

AOA	V = 10m/s		V = 30m/s	
	$\bar{D} + \frac{d\bar{L}}{d\alpha}$	안정성 평가	$\bar{D} + \frac{d\bar{L}}{d\alpha}$	안정성 평가
-2	0.035494	안정	0.038298	안정
-1	0.025607	안정	0.044724	안정
0	0.057773	안정	0.058314	안정
1	0.094878	안정	0.093763	안정
2	0.091427	안정	0.091055	안정
3	0.101738	안정	0.102943	안정
4	0.090274	안정	0.093394	안정
5	0.069808	안정	0.06598	안정
6	0.105865	안정	0.135452	안정

3. 결론

해상 교량은 장대 교량인데다 높은 풍속까지 견뎌 내야 하므로 내풍 안정성 검토의 중요성이 부각되고 있다. 또한 구조물의 내풍설계는 풍동실험을 통해 동적, 정적 거동을 예측하는 것이 일반적이나 비용과 시간이 너무 많이 소요되고, 완벽한 상사에 대한 문제와 필요 데이터 추출 방법 등에 따라 편차가 심하게 나타난다. 따라서 본 논문에서는 풍동실험의 보완 및 대체 수단으로서 전산 유체 해석 프로그램인 EDISON_CFD를 이용하여 정적공기력계수를 산출하였다. 양력계수와 항력계수를 이용하여 거가대교와 이순신대교의 자발진동 중 깰로핑(Galloping) 현상에 대한 평가를 통해 동적 불안정성을 평가하였다.

속도와 받음각의 변화에 대해 깰로핑 평가 결과 거가대교와 이순신대교 모두 안정한 것으로 나타났다. 또한 거가대교의 경우 긴 폭에 비해 높이가 상대적으로 매우 작아 얇은 평판에 작용하는 공력특성과 비슷한 경향을 나타내었고, 이순신대교의 경우 트윈박스 갭 사이즈가 4.3m로 최적화 되어 있어 양력 계수의 값이 매우 작아 교량에 있어 유리한 단면을 가지고 있는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 첨단 사이언스 교육 허브 개발 사업(과제 No. 2011-0020564) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Cho, J. Y., Lee, H. E., and Kim, Y. M., 2006, "Experimental Investigation of Aerodynamic Force Coefficients and Flutter Derivatives of Bridge Girder Sections," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 5A, pp. 887~899
- (2) Shin, H. S., Kim, B. C., Yhim, S. S., Lee, Y. H., Song, J. J., and Hwang, Y. K., 2013, "Wind Stability Analysis of an Over-Sea Cable Stayed Bridge Considering in-site Turbulence Properties," *Journal of KOSHAM*, Vol. 13, No. 5, pp. 075~082
- (3) Lee, S. H., Yoon, J. G., and K, S. D., 2013, "Aerodynamic Forces Acting on Yi Sun-sin Bridge Girder According to Reynolds Numbers," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 1, pp. 93~100