

Navier-Stokes 방정식을 이용한 교량 구조물의 공탄성 해석

Aeroelastic Analysis of Bridge Girder Section Using Navier-Stokes Equations

박성종* 권혁준** 유재한** 이인*** 한재홍***
Park, Seong-jong Kwon, Hyuk-Jun You, Jae-Han Lee, In Han, Jae-Heung

ABSTRACT

This paper deals with numerical analysis of static and dynamic wind effects on civil engineering structures. Aeroelastic analysis becomes a prime criterion to be confirmed during the structural design because the long-span suspension bridges are prone to the aerodynamic instabilities caused by wind. If the wind velocity exceeds the critical velocity that the bridge can withstand, then the bridge fails due to the phenomenon of flutter. The aeroelastic simulation is carried out using both Computational Fluid Dynamic(CFD) and Computational Structural Dynamic(CSD) schemes.

1. 서론

유체가 물체 주위를 흐를 경우 물체와 유동은 서로 영향을 주고받게 된다. 유체에 의해 물체에 변형이 발생하고, 물체의 변형에 따라 물체 주위의 유동장도 변하게 된다. 이러한 일련의 과정이 그 진폭을 증가시키는 경향을 나타낼 경우, 그 구조물은 공기역학적으로 불안정하며, 매우 큰 진폭으로 진동하게 된다. 유동장 내에서 유체와 구조물 사이에서는 서로 같은 크기로 방향이 반대인 반력이 존재한다. 따라서 구조물의 진동은 와류회림(vortex shedding)과 동조 될 수 있으며, 이때 유체 유동에 대변위(large-amplitude) 진동을 유발하게 된다.

현수교는 바람에 의한 공기역학적 불안정성에 놓여 있으므로, 공탄성 해석은 설계에서 고려되어야 하는 주요한 척도이다. 풍속이 플러터의 임계 속도를 넘어서면, 교량 구조물은 바람과의 상호 작용으로 인하여 붕괴된다. 1940년 정적 풍속 $65m/sec$ 로 설계된 Tacoma Narrow 현수교가 개통된 지 불과 4개월만에 단지 $19m/sec$ 의 바람에 붕괴된 사고는 정적 하중상태에 대해 안전한 교량이 바람과의 상호작용에 의해 그 진폭이 증가하여 결국 파괴에 도달하는 결과를 보여주었다. 따라서 바람에 의해 발생하는 플러터 불안정성과 같은 유체역학적 응답은 길이가 긴 교량의 설계에서 중요한 관심사가 되었다. 플러터는 공력탄성학적 불안정 현상 중에서도 유체 유발 진동(Flow Induced Vibration, FIV) 현상에 해당된다. 플러터 불안정성은 교량에 불어오는 바람과 구조물의 상호작용에 의한 자기 가진(self-excited) 힘에 의해 발생된다. 따라서 교량 구조물의 플러터 특성을 파악하여 그 안정성을 살펴볼 필요가 있다.

* 한국과학기술원 항공우주공학과 석사과정
** 한국과학기술원 항공우주공학과 박사과정
*** 한국과학기술원 항공우주공학과 교수

Kuroda⁽¹⁾는 비압축성 Navier-Stokes(N/S) 방정식을 이용하여 현수교 단면의 유동 흐름을 특정한 레이놀즈수(R_N), $R_N=1 \times 10^5$ 에서 수치적으로 해석하였다. Larsen 등⁽²⁾은 이산와법(discrete vortex method)을 이용하여 $R_N=1 \times 10^5$ 에서 교량 구조물의 공탄성 해석을 수행하였다. 고현무 등⁽³⁾은 와류 홀림에 의한 토목 구조물의 공력탄성학적 거동을 수치적으로 연구하였다. Panneer 등⁽⁴⁾은 LES(large eddy simulation)를 이용하여 교량 구조물의 플러터 발생 속도를 예측하였다.

본 연구의 목적은 2차원 비압축성 비정상 N/S 코드를 이용하여 유체와 구조물간의 상호 작용에 따른 유체 유발 진동을 구현함으로써 2자유도계 교량 단면의 공탄성 시스템에 대한 해석을 수행하는 것이다. 전산유체역학에 기초한 비정상 공기력을 구하고, 이를 바탕으로 교량 구조물의 공탄성 안정성을 검증하였다. Fluent Inc.의 격자 생성 모듈인 GAMBIT(Ver2.0)을 이용하여 구조물을 모델링하고, FLUENT(Ver6.1)를 이용하여 공기력을 얻었다. 탄성 운동 방정식은 FLUENT의 User-Defined Function (UDF)으로 프로그래밍하여 교량 구조물의 공탄성 응답을 얻었다.

2. 비정상 공기력 해석

2.1 유동의 지배방정식

교량을 지나는 유동은 속도가 느리기 때문에 비압축성 유동으로 해석할 수 있다. 2차원 물체 주위의 비정상, 비압축성 유동문제를 해석하기 위해서는 격자의 움직임이 있는 문제를 다룰 수 있어야 한다. 이러한 유동의 지배방정식인 N/S 방정식은 연속 방정식(continuity equation)과 운동량 방정식(momentum equation)으로 이루어지며, 무차원화하면 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0, \quad \frac{D\vec{u}}{Dt} = \nabla \frac{p}{\rho} + \nu \Delta \vec{u} \quad (2.1)$$

여기서, \vec{u} 는 u, v, w 의 속도벡터, p 는 압력, D/Dt 는 $\partial/\partial t + \vec{u} \cdot \nabla$ 이며, 자유 흐름의 속도 V_∞ 와 밀도 ρ , 대표 길이 L 로 무차원화 되어있다.

$$\vec{u}^* \equiv \frac{\vec{u}}{V_\infty}, \quad p^* \equiv \frac{p}{\rho_\infty V_\infty^2}, \quad x^* \equiv \frac{x}{L}, \quad t^* \equiv \frac{t V_\infty}{L} \quad (2.2)$$

2.2 선형화 및 차분(Discretization)

지배 방정식은 모든 계산 격자에서 종속 변수에 대한 일련의 방정식 시스템을 만들기 위하여 선형화 된다. 결과적인 선형 시스템은 흐름 응답을 얻기 위하여 풀린다. 지배 방정식이 선형화 되는 방법은 종속 변수에 대해 “explicit(외재적)”나 “implicit(내재적)” 형태를 취할 것이다.

본 연구에서는 비정상 유동에 대한 효율적인 계산을 위하여 2차 정확도의 내재적 시간 적분법을 사용하였다. 내재적 방법은 많은 기억 용량과 복잡한 알고리즘을 필요로 하므로 수치계산에서 적용하기는 쉽지 않지만, 안정성이 좋아서 시간 간격을 크게 할 수 있는 장점이 있다. 특히, 비정상 유동의 계산에서는 수많은 반복계산이 요구되므로 내재적 방법이 적절한 시간 적분법이다. FLUENT는 선형 방정식 시스템을 풀기 위해 다중격자법을 함께 사용한다.⁽⁵⁾

2차원 물체 주위의 비정상 유동을 해석의 공간 차분법으로는 격자 중심(cell centered)의 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)을 사용하였고, 시간 적분법으로는 Point-Gauss-Seidel 반복계산 기법을 이용한 2차의 내재적 시간 적분법(2nd order implicit)과 이중 시간 전진 기법(dual time stepping)을 사용하였다.

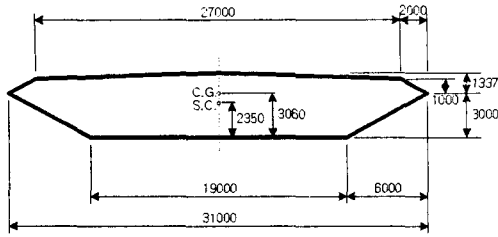


Fig. 1. Cross-section of the GBEB suspension span.

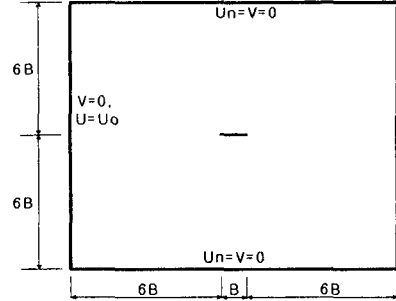


Fig. 2. Solution domain and the Boundary condition.

유한체적법에서는 전체 계산영역을 많은 수의 제어체적들로 나누어서, 각각의 제어체적에 지배방정식을 적용하여 계산한다. 각각의 제어체적들은 이웃한 제어체적과 경계면을 공유하게 되고, 제어체적에서 경계면을 통하여 나간 유량(flux)은 그 면을 공유하는 제어체적으로 들어가게 되므로 지배방정식에서의 보존성을 유지하게 된다. 제어체적에서의 모든 변수들은 수치적으로 제어체적에 대한 평균값을 나타내게 된다. 제어체적이 시간에 따라 변형되지 않는 경우, 보존변수 Q 의 체적 평균값을 i 번째 제어체적에 대하여 유한체적법으로 이산화하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_i \frac{\partial Q_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^{N_{face}} F_{ij} S_{ij} = 0, \quad Q_i = -\frac{1}{V} \int_V Q dV \quad (2.3)$$

여기서, N_{face} 는 제어체적의 경계면의 수이며, F_{ij} 는 비점성 유량(flux)을 의미한다.

비정상 시뮬레이션에서, 지배방정식은 공간과 시간에 대해 모두 차분되어야만 한다. 시간 차분은 시간 간격, Δt 에 대하여 미분 방정식의 모든 항의 적분을 포함한다. 유한체적법을 이용하여 차분된 지배방정식에서 시간에 대한 항을 후방 차분법을 적용하여 선형화 하면, 다음과 같은 차분화된 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{Q^{n+1} - Q^n}{\Delta t} = \frac{2 + \phi}{2} \frac{\Delta Q}{\Delta t} + \frac{2 + \phi}{2} \frac{Q^* - Q^n}{2} - \frac{\phi}{2} \frac{Q^n - Q^{n-1}}{\Delta t} \quad (2.4)$$

여기서, Q^* 는 반복계산의 중간 단계 값을 나타내며, ϕ 는 시간 정확도를 결정하는 상수로써 ϕ 의 값이 0이면 시간적으로 1차의 정확도를 가지는 경우이고, ϕ 의 값이 1이면 시간적으로 2차의 정확도를 가지는 경우이다.

2.3 비정상 공기력 해석

플러터 해석 시 정확한 공기력은 매우 중요하다. 본 연구에서는 검증 모델로 GBEB(Great Belt East Bridge)의 girder section을 선택하였다. GBEB는 지간 길이 535m-1624m-535m의 3-지간 현수교로, 세계에서

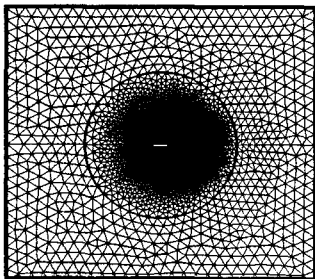


Fig. 3. Grid-C6.

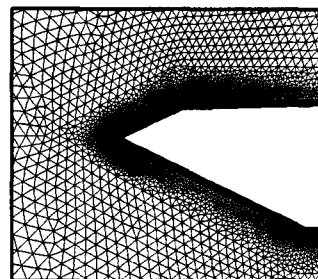


Fig. 4. Close-up view of Grid-C6

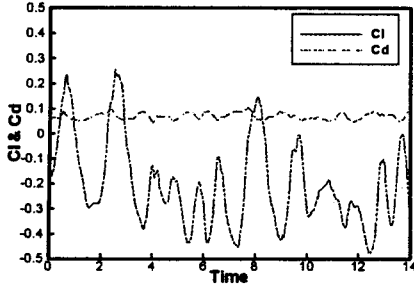


Fig. 5. Drag and Lift coefficients vs. Time for Grid-C6.

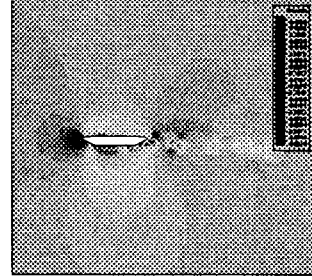


Fig. 6. Pressure Contour for Grid-C6.

두 번째로 긴 교량이다. Fig. 1.에는 GBEB 중앙 경간(suspension span)의 단면을 나타내고 있다. 회전 운동과 병진 운동이 같은 중심에 대하여 발생하기 때문에 두 운동 사이에는 연계가 없다.⁽⁴⁾

해석을 위한 격자 모델을 선택하기 위하여, 처음 격자 간격(spacing) 및 격자(cell) 개수가 다른 8가지의 모델을 검증하였다. 각 모델의 spacing 및 격자 개수는 Table 2에 나타내었다. 각 모델의 격자는 삼각형의 비정렬 격자를 사용하였다. Fig. 2.에 계산 영역과 경계 조건을 나타내었다. 입구 경계에서 x 방향으로는 '1', y 방향으로는 '0'의 균일한 속도를 갖는다. 각 측면 경계에서는 미끄럼 경계를 갖는다.

교량은 실제 유동 영역인 $R_N=1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$ 근방에 놓여 있다. 그러나 풍동 실험에서 실제 크기의 교량 단면에 실험을 수행하기는 어렵다. 풍동 실험에서 축소 모델을 사용하고, 따라서 이러한 R_N 영역에서의 공기력 실험은 현재 어렵다. 최근에 수치해석을 이용한 풍공학 연구는 풍동 실험 결과와 비교를 하고 있기 때문에, 이러한 R_N 에서는 해석이 많이 이루어지지 않았다. 풍동 실험 및 다른 수치 결과와 비교하기 위해 해석은 $R_N=1 \times 10^6$ 에서 수행하였으며, 시간 간격은 $\Delta t=0.0001$ 의 무차원시간을 사용하였다.

실험 결과와의 검증을 위하여, 식(2.5)와 같이 정의되는 항력 계수(C_d)와 Strouhal 수(S_t)를 비교하였다.

$$C_d = \frac{F_x}{0.5\rho V^2 BW}, \quad S_t = \frac{H}{TV} \quad (2.5)$$

여기서, B, H, W 는 각각 단면의 길이, 높이 및 깊이이며, T 는 양력의 진동주기, V 는 자유 흐름의 속도이다.

Table 1. Summary of the runs in relation to various grid configurations

Case	Spacing	Cells	C_d	S_t
C1	0.0001	106,046	0.080	0.115
C2	0.0002	81,868	0.074	0.120
C3	0.0002	67,916	0.066	0.111
C4	0.0005	64,496	0.071	0.115
C5	0.0002	49,480	0.072	0.113
C6	0.0005	46,488	0.070	0.120
C7	0.001	44,068	0.073	0.168
C8	0.005	24,798	0.066	0.109

Table 2. Comparison of drag coefficient and Strouhal number obtained from numerical simulations and wind tunnel tests

	C_d	S_t
Present Study (C6)	0.070	0.120
Larsen et al.(1997)	0.061	0.100-0.168
Taylor et al.(1999)	0.050	0.16-0.18
Selvam et al.(2001)	0.062	0.140
Wind Tunnel Tests	0.077	0.109-0.158

Table 1.은 각 격자 모델에서의 공기력 해석 결과를 보여준다. 격자 검증 결과 Case-C6의 격자 모델을 선택하였으며, C6의 격자는 Fig. 3.과 Fig. 4.에 나타내었다. Table 2.는 본 연구에서 선택한 격자 모델에 대한 풍동 실험 및 다른 수치해석 결과와의 비교를 보여준다. 항력 계수 및 Strouhal 수 모두 실험 및 다른 수치 해석 결과와 잘 일치하였다. Fig. 5.는 무차원시간에 대한 양력 계수와 항력 계수를, Fig. 6.은 교량 단면 주위의 순간 압력장을 나타낸다.

3. 공탄성 해석

3.1 구조선형 운동방정식

물리영역에서 구조적 비선형성을 무시하는 것(단, 우변의 외력은 비선형일 수 있음)으로 가정하고, 감쇠를 고려한 탄성체의 운동방정식은 다음과 같이 전형적인 행렬형태로 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{F(t, u, \dot{u})\} \quad (3.1)$$

여기서, $[M]$ 은 질량행렬, $[C]$ 는 감쇠행렬, $[K]$ 는 일반화된 강성행렬이며, $\{F\}$ 는 외력 벡터로 유동박리 등이 연계된 고 받음각 유동의 경우 일반적으로 비선형 외력 항이 된다. 식(3.1)의 n -자유도의 변위계 $u_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, n$)에 대하여, 위 시스템의 고유 모드 벡터들로 이루어진 상수 변환행렬(transformation matrix)을 $[\phi]$ 로 정의하면, 일반화된 좌표계(generalized coordinate) $q_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, n$)에 대하여 다음과 같은 선형변환을 정의할 수 있다.

$$\{u(t)\} = [\phi]\{q(t)\}, \quad \{\dot{u}(t)\} = [\phi]\{\dot{q}(t)\}, \quad \{\ddot{u}(t)\} = [\phi]\{\ddot{q}(t)\} \quad (3.2)$$

위의 식(3.2)를 식(3.1)에 대입하고, 양변에 $[\phi]^T$ 를 취하면 다음과 같이 일반화된 좌표계에서의 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$[M_g]\{\ddot{q}(t)\} + [C_g]\{\dot{q}(t)\} + [K_g]\{q(t)\} = \{Q(t, q, \dot{q})\} \quad (3.3)$$

여기서, $[M_g]$ 는 일반화된 질량행렬을, $[K_g]$ 는 일반화된 강성행렬을 그리고 $\{Q(t)\}$ 는 시간영역에서의 일반화된 공기력 벡터를 나타내며 각각 아래와 같이 정의된다.

$$[M_g] = [\phi]^T [M] [\phi], \quad [C_g] = [\phi]^T [C] [\phi], \quad [K_g] = [\phi]^T [K] [\phi],$$

$$[Q(t)] = [\phi]^T [F(t)], \quad (3.4)$$

$$Q(t)_i = \frac{1}{2} \rho U^2 \iint_S (C_{p_L}(x, y, t) - C_{p_U}(x, y, t)) \Psi_i(x, y) dx dy$$

위 식에서 Ψ_i 는 i -번째 고유모드 벡터를 의미한다. 일반적으로 $[M_g]$ 와 $[K_g]$ 등은 대부분 유한요소 고유진동 해석 결과를 통해 직접 구할 수 있으며, $[C_g]$ 는 일반적인 진동해석에서처럼 $2\zeta_i \omega_i [M_g]$ 값을 적용하면 된다.

식(3.3)의 적분을 용이하게 수행하기 위하여 $2n$ -차원의 상태공간 행렬 형태로 변환하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\{\dot{x}(t)\} = [A]\{x(t)\} + [B]\{u(t)\} \quad (3.5)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M_g]^{-1}[K_g] & -[M_g]^{-1}[C_g] \end{bmatrix}, \quad [B] = \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & [M_g]^{-1} \end{bmatrix}$$

$$\{x(t)\} = \begin{Bmatrix} \{q(t)\} \\ \{\dot{q}(t)\} \end{Bmatrix}, \quad \{u(t)\} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{Q(t)\} \end{Bmatrix} \quad (3.6)$$

$$Q(t)_i = \frac{1}{2} \rho U^2 \int \int_S -\Delta C_p(x, y, z, t) (n_x \Psi_{xi} + n_y \Psi_{yi} + n_z \Psi_{zi}) dx dy$$

위 식에서 i 는 가진 모드를 의미하며, Ψ 는 고유 모드 벡터를, S 는 교량 구조물의 투영면적이며, ρ 는 공기의 밀도를, U 는 자유흐름의 속도를 의미한다.

해석에 고려된 자유도가 n 이라 할 때 $[A]$, $[B]$ 행렬은 $2n \times 2n$ 크기를 가지며 시스템의 특성에 관계된다. 대부분의 경우에 있어서 $[A]$, $[B]$ 행렬은 상수행렬이 된다. 위의 식(3.5)는 유한차원 선형 미분 방정식으로 엄밀 해는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\{x(t)\} = [\Phi(t)]\{x(0)\} + \int_0^t e^{[A](t-\tau)} [B]\{u(\tau)\} d\tau \quad (3.7)$$

여기서, 상태전이 행렬인 $[\Phi(t)] = e^{[A]t}$ 는 일반적으로 행렬 지수 함수(matrix exponential function)의 충분한 수의 시리즈 전개를 함으로써 수치에러가 거의 없는 정확한 계산이 가능하다.

3.2 2-자유도계 등가 공탄성 해석

피치(pitch)와 헤브(heave) 자유도가 있는 2-자유도계 등가(equivalent) 교량 단면은 3차원 교량의 동적 안정성에 대한 구조 단순화 모델로 공탄성(aeroelasticity) 해석에 적용될 수 있다. 특히 구조 변수 및 공력 변수들이 상호 민감하게 연계되어 있는 공력탄성학적 동적 응답(dynamic response) 및 플러터(flutter) 안정성 문제에 있어서 정교한 해석 기법의 개발이나, 다양한 구조 매개 변수들의 영향에 대한 연구를 위한 다양한 반복계산의 요구에 대하여 많은 경우 매우 이상적인 연구모델을 제공할 수 있다.

Fig. 7.에 피치와 헤브 자유도를 가지는 2-자유도계 등가 공탄성 시스템의 개념도를 제시하였다. 이에 대한 공탄성 방정식을 유도하면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$m\ddot{h} + g_h \dot{h} + k_h h = L(t) \quad (3.8)$$

$$I\ddot{\alpha} + g_\alpha \dot{\alpha} + k_\alpha \alpha = M(t) \quad (3.9)$$

여기서, m 은 단면의 질량을, 상(上) 점은 시간에 대한 미분율, h 는 단면의 수직자유도를, g_h 와 g_α 는 각각 헤브와 피치 방향에 대한 구조감쇠계수를, k_h 와 k_α 는 각각 헤브축과 피치축의 스프링 강성을, 우변의 $L(t)$ 와 $M(t)$ 는 비정상 양력과 모멘트를 의미한다. I 는 단면의 피치축에 대한 단위 스펠 길이당 관성 모멘트(moment of inertia)를 의미하며, 정의는 다음과 같다.

$$I = \int_c x^2 \rho dx \quad (3.10)$$

ρ 는 단위길이 당 교량 단면의 질량을 의미한다. 식(3.8)과 식(3.9)를 무차원화 하기 위해 다음과 같은 정의를 도입한다.

$$\omega_h = \left(\frac{k_h}{m}\right)^{(1/2)}, \quad \omega_a = \left(\frac{k_a}{m}\right)^{(1/2)}, \quad r_h = \left(\frac{I}{mb^2}\right)^{(1/2)}, \quad \mu = \frac{m}{\pi\rho b^2}, \quad (3.11)$$

$$\zeta_h = \frac{g_h}{2}(mk_h)^{(1/2)}, \quad \zeta_a = \frac{g_a}{2}(Ik_a)^{(1/2)}, \quad U^* = \frac{U_\infty}{b\omega_a}$$

위의 정의를 이용해 공탄성 지배방정식 식(3.8)과 식(3.9)를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]\{u''(\tau)\} + [C]\{u'(\tau)\} + [K]\{u(\tau)\} = \{F(\tau)\} \quad (3.12)$$

위 식에서 프라임(')은 무차원시간 $t(=a\omega t/c)$ 에 대한 미분을 의미한다. 식(3.8)과 식(3.9)는 2차 2계 선형 미분 방정식이며, 아래와 같이 상태공간 행렬 형태의 1차 4계 선형미분방정식 형태로 쓸 수 있다.

$$\{\dot{y}(\tau)\} = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \{y(\tau)\} + \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & [M]^{-1} \end{bmatrix} \{Y(\tau)\} \quad (3.13)$$

식(3.14)에 식(3.7)을 적용하여 플러터 해석을 수행하였다. Fig. 8.은 $U=37m/sec$, Fig. 9.는 $U=64m/sec$, 그리고 Fig. 10.은 $U=69m/sec$ 에서의 피치(pitch)에 대한 공탄성 응답을 나타낸다. 본 연구에서 GBEB 중앙 경간(suspension span)은 $U=64m/sec$ 의 속도에서는 중립응답을 나타내고 있다. 그렇지만, $U=69m/sec$ 의 속도에서 플러터가 발생하였다. 따라서 플러터의 임계속도는 $64\sim 69m/sec$ 의 구간에 있다고 예측된다. Table 3.의

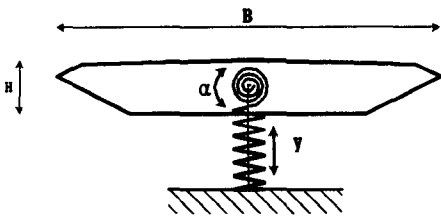


Fig. 7. Structural model of the GBEB section.

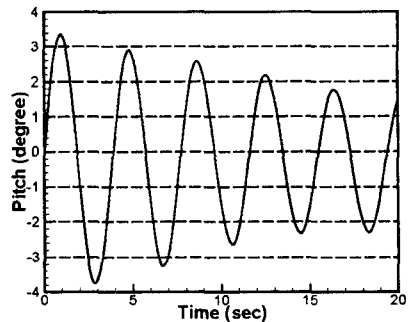


Fig. 8. Condition for No Flutter: $U=37m/sec$.

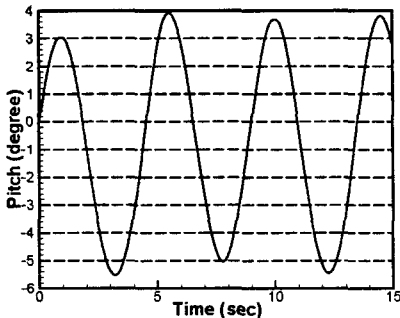


Fig. 9. Condition for No Flutter: $U=64m/sec$.

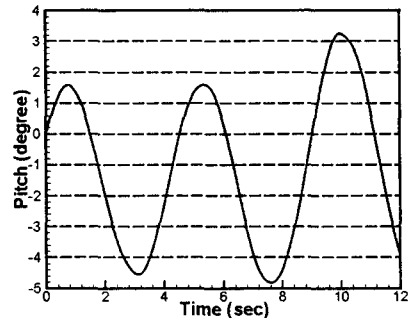


Fig. 10. Condition for Flutter: $U=69m/sec$.

다른 수치결과 및 풍동실험과의 비교에서 보는 바와 같이 플러터 예측 결과와 잘 일치하고 있다. Table 4.는 참고문헌 [4]에서 해석한 공탄성 응답과 주파수 비교를 나타낸다. Table 4.에서 보는 바와 같이 공탄성 주파수도 잘 일치한다.

Table 3. Summary of results for flutter computations for GBEB suspension span

	Present Study	Selvam et al. (2001)	Larsen et al. (1997)	Frandsen et al. (1998)	Enevoldsen et al. (1999)	Wind Tunnel Tests
U (m/sec)	64~69	64.6	74	50	70~80	73

Table 4. Comparison of aeroelastic frequency responses for GBEB suspension span

	$U = 37$ m/sec	$U = 69$ m/sec
Present Study	0.26 Hz	0.21 Hz
Selvam et al. (2001)	0.26 Hz	0.20 Hz

4. 결론

본 연구에서는 3차원 교량 구조물의 구조 단순화 모델인 2-자유도계 등가 교량 단면을 이용하여 공탄성 안정성을 검증하였다. 이를 위하여 FLUENT의 2차원 비압축성 비정상 N/S 코드를 이용하여 교량 구조물의 공기력을 구하고, 이를 바탕으로 공기와 교량 구조물간의 상호 작용에 따른 유체 유발 진동을 구현하여 플러터 해석을 수행하였다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 과학기술부의 국가지정연구실사업의 연구비 지원에 의해 수행된 연구결과 의 일부이며 지원에 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Shinichi Kuroda, "Numerical Simulation of Flow around a Box Girder of a Long Span Suspension Bridge," *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 67&68, 1997, pp.239~252
2. Allan Larsen and Jens H. Walther, "Aeroelastic Analysis of Bridge Girder Sections Based on Discrete Vortex Simulations," *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 67 & 68, 1997, pp.253~265
3. 고현무, 이재석, 정운용, 박시환, "Vortex Shedding에 의한 토목 구조물의 공탄성학적 거동에 대한 수치 해석적 연구", 한국강구조학회 논문집, 제7권 제2호, 1995, pp.237~246
4. R. Panneer Selvam and Suresh Govindaswamy, "A Report on Aeroelastic Analysis of Bridge Section Using Computer Modeling," *a report for Mack Blackwell Transportation Center*, 2001, pp.1~109,
5. Fluent, *Fluent 6 User's Guide Volume 1 & 5*, Fluent Inc, 2001