

## 교량 구조물의 유체유발 진동해석

### Flow-induced Vibration Analysis of Bridge Girder Section

박성종\* · 권혁준\*\* · 이인† · 한재흥\*\*\*

Seong-jong Park, Hyuk-Jun Kwon, In Lee and Jae-Heung Han

(2004년 1월 8일 접수 : 2004년 4월 1일 심사완료)

**Key Words** : Aeroelasticity(공탄성), Flutter(플러터), Buffeting(버펫팅), Suspension Bridge(현수교)

#### ABSTRACT

Numerical analysis of static and dynamic wind effects on civil engineering structures was performed. Long-span suspension bridges are flexible structures that are highly sensitive to the action of the wind. Aerodynamic effect often becomes a governing factor in the design process of bridges and aeroelastic stability boundary becomes a prime criterion which should be confirmed during the structural design stage of bridges 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. Buffeting caused by turbulence results in structural fatigue, which could lead to the failure of a bridge. Navier-Stokes equations are used for the aeroelastic analysis of bridge girder section. The aeroelastic simulation is carried out to study the aeroelastic stability of bridges using both Computational Fluid Dynamic (CFD) and Computational Structural Dynamic (CSD) schemes.

#### 1. 서론

유체가 물체 주위를 흐를 경우 물체와 유동은 서로 영향을 주고 받게 된다. 유체에 의해 물체에 변형이 발생하고, 물체의 변형에 따라 물체 주위의 유동장도 변하게 된다. 이러한 일련의 과정에 의해 물체의 변위가 증가하는 경향이 나타날 경우, 그 구조물은 공력탄성학(aeroelasticity)적으로 불안정한 상태에 놓이게 되며, 매우 큰 진폭으로 진동하게 된다. 이러한 유체/구조 연계 불안정 진동 현상에는 플러터(flutter),

버펫팅(buffeting) 등이 있으며, 이는 구조물의 파손에 직접적인 연관이 있으므로 설계 시 필수적인 고려사항이 된다.

플러터는 공력탄성학적 불안정 현상 중에서도 유체유발 진동(flow induced vibration, FIV) 현상에 해당된다. 플러터 불안정성은 불어오는 바람과 구조물의 상호작용에 의한 자기가진(self-excited) 힘에 의해 발생된다. 유동장 내에서 유체와 구조물 사이에는 서로 같은 크기로 방향이 반대인 반력이 존재한다. 따라서 구조물의 진동은 와류회림(vortex shedding)과 동조될 수 있으며, 이때 대변위(large-amplitude) 진동을 유발하게 된다. 플러터 현상이 유발되면 순식간에 매우 위험한 구조 파손이 초래된다.

버펫팅은 유속 변동(fluctuation)의 비정상 하중으로 인한 구조물의 진동 현상으로써 구조 피로를 야기한다. 이는 플러터와 달리 자기가진 힘에 의해 발생하지 않는다. 버펫팅에는 두 가지 종류가 있다. 한 가

† 책임저자 : 정희원, 한국과학기술원 항공우주공학과  
E-mail : inlee@asdl.kaist.ac.kr

Tel : (042) 869-3717, Fax : (042) 869-3710

\* 대우일렉트로닉스 홈어플라이언스 연구소

\*\* 한국과학기술원 항공우주공학과

\*\*\* 정희원, 한국과학기술원 항공우주공학과

지는 난류에 의해 야기되며, 다른 한 가지는 상류의 이웃한 구조물에 의해 생성된 교란에 의해 야기된다.

현수교는 시간이 길어 공력탄성학적 불안정 상태에 놓일 수 있으므로, 공탄성 해석은 설계에서 고려되어야 하는 주요한 척도이다. 풍속이 플러터의 임계 속도를 넘어서면, 교량 구조물은 바람과의 상호작용으로 인하여 붕괴된다. 버펫팅은 교량의 구조 피로를 야기하며, 교량 위를 지나는 차량의 안전성에도 영향을 미친다. 따라서 바람에 의해 발생하는 플러터나 버펫팅과 같은 공력탄성학적 응답은 시간이 긴 교량의 설계에서 중요한 관심사가 되었다.

Larsen<sup>(1)</sup>은 여러 가지 풍동실험 기법을 이용하여 현수교의 축소 모델에 대한 임계 플러터 속도와 버펫팅 응답을 구하였다. Larsen 등<sup>(2)</sup>은 이산와법(discrete vortex method)을 이용하여 교량 단면의 공탄성 해석을 수행하였다. Selvam 등<sup>(3)</sup>은 LES(large eddy simulation)를 이용하여 교량 단면의 공탄성 해석을 수행하였다. 장태진<sup>(4)</sup>은 날개 익형에 대한 저속 유체유발 비선형 진동특성을 연구하였다. 박성중<sup>(5)</sup>은 유체유발 진동현상을 구현하여 교량 구조물의 플러터 및 버펫팅 해석을 수행하였으며, 또한 강성에 따른 임계 플러터 속도를 연구하였다.

본 연구의 목적은 2차원 비압축성, 비정상 N/S 코드를 이용하여 유체와 구조물간의 상호작용에 따른 유체유발 진동을 구현함으로써 교량 단면의 공탄성 시스템에 대한 해석을 수행하는 것이다. 래터럴(lateral), 히브(heave) 및 피치(pitch)의 3-자유도계 교량 단면의 공탄성 시스템에 대한 플러터 해석을 수행하고, 이를 히브와 피치의 2-자유도계 시스템과 비교하였다. 또한 3-자유도계 공탄성 시스템을 이용하여 버펫팅 응답을 구하였다. 이를 위하여 전산유체역학(CFD)에 기초하여 비정상 공기력을 구하였고, 전산구조역학(CSD)에 기초하여 교량 구조물의 응답을 얻어 교량 구조물의 공탄성 안정성을 검증하였다. 비정상 공기력은 Fluent Inc.의 FLUENT(Ver6.1)를 이용하였으며, 탄성 운동 방정식은 연계 시간적분법을 이용하여 프로그래밍하였다. 본 연구는 전산풍공학(CWE)에 대한 연구를 통하여, 교량의 내풍설계에 적용하기 위한 수치해석적 방법을 제시하고자 하는데 그 배경이 있다.

## 2. 비정상 공기력 해석

### 2.1 유동의 지배방정식

교량을 지나는 유동은 속도가 느리기 때문에 비압축성 유동으로 간주할 수 있다. 이러한 유동의 지배방정식인 비압축성 N/S 방정식은 연속 방정식(continuity equation)과 운동량 방정식(momentum equation)으로 이루어지며, 무차원화하면 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \vec{u}^* = 0, \frac{D\vec{u}^*}{Dt^*} = \nabla \frac{p^*}{\rho^*} + \nu \Delta \vec{u}^* \quad (1)$$

여기서,  $\vec{u}^*$ 는 속도벡터,  $p^*$ 는 압력,  $D/Dt^*$ 는  $\partial/\partial t^* + \vec{u}^* \cdot \nabla$ 이며, 다음과 같이 자유 흐름의 속도  $V_\infty$ 와 밀도  $\rho$ , 대표 길이  $L$ 로 무차원화하였다.

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

### 2.2 선형화 및 차분(Discretization)

지배 방정식은 모든 계산 격자에서 종속 변수에 대한 일련의 방정식 시스템을 만들기 위하여 선형화 된다. 본 연구에서는 비정상 유동에 대한 효율적인 계산을 위하여 내재적(implicit) 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. 본 연구에서는 다중격자법(multi-grid method)을 함께 사용한다.

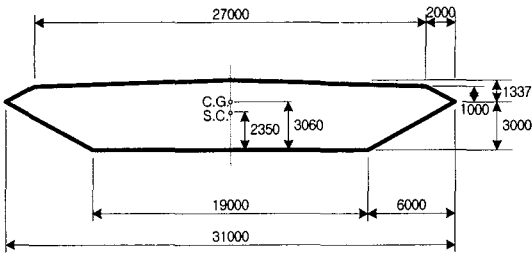
공간 차분법으로는 격자 중심(cell centered)의 유한체적법(FVM)을 사용하였고, 시간 적분법으로는 Point-Gauss-Seidel 반복계산 기법을 이용한 내재적 시간 적분법과 이중 시간 전진 기법(dual time stepping)을 사용하였다.

### 2.3 비정상 공기력 해석

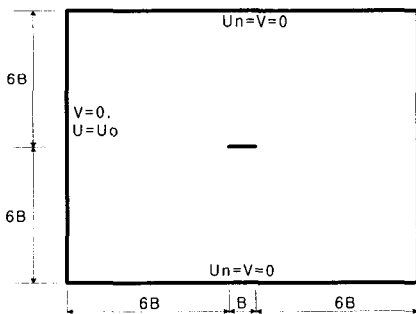
공탄성 해석 시 정확한 공기력 해석은 매우 중요하다. 본 연구에서는 검증 모델로 GBEB(great belt east bridge)의 girder section을 선택하였다. GBEB는 시간 길이 535 m-1624 m-535 m의 3-지간 현수교

**Table 1** Structural Properties of GBEB suspended span

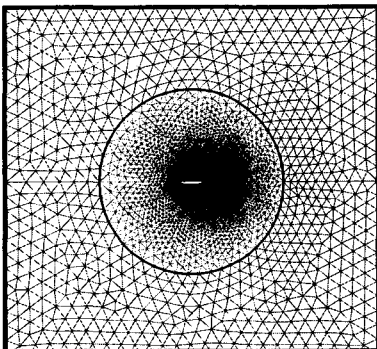
Mass (Kg/m)	$2.27 \times 10^4$
Inertia (Kgm <sup>2</sup> /m)	$2.47 \times 10^6$
$f_l$ (Hz)	0.052
$f_h$ (Hz)	0.100
$f_a$ (Hz)	0.272
$\zeta$ (rel-to-crit)	0.002



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



**Fig. 2** Solution domain and the boundary conditions



**Fig. 3** FVM grid system of grid-C6

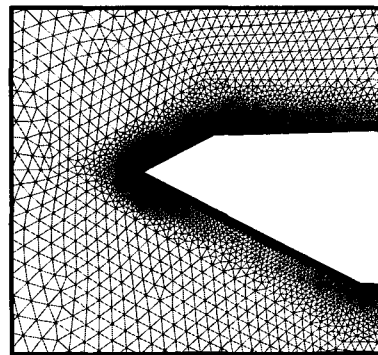
로, 세계에서 두 번째로 긴 교량이다. Fig. 1에는 GBEB 중앙 경간(suspension span)의 단면을 나타내고 있으며, Table 1에는 GBEB의 물성치를 나타내고 있다.

해석을 위한 격자 모델을 선택하기 위하여, 처음 격자 간격(spacing) 및 격자(cell) 개수가 다른 8가지의 모델을 검증하였다. 각 모델의 처음 격자 간격 및 격자 개수는 Table 2에 나타내었다. 각 모델의 격자는 삼각형과 사각형의 비정렬 격자를 사용하였다. Fig. 2에 계산 영역과 경계 조건을 나타내었다. 입구 경계에서 x 방향으로의 '1', y 방향으로의 '0'의 균일한 속도를 갖는다. 각 측면 경계에서는 미끄럼 경계 조건을 갖는다. 본 연구는 다른 수치 결과 및 풍동 실험 결과와 비교를 위해  $R_N=1 \times 10^5$ 에서 수행하였다.

결과의 검증을 위하여, 식 (3)과 같이 정의되는 항력 계수(Cd)와 Strouhal 수(St)를 비교하였다.

$$C_d = \frac{F_x}{0.5\rho V^2 BW}, S_t = \frac{H}{TV} \quad (3)$$

여기서, B, H, W는 각각 단면의 폭, 높이 및 두께



**Fig. 4** Close-up view of grid-C6

**Table 2** Results of the grid refinement tests

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

이며,  $T$ 는 양력의 진동주기,  $V$ 는 자유 흐름의 속도이다.

Table 2는 자유 흐름 속도  $V=53\text{ m/s}$ 에서 각 격자 모델의 공기력 해석에 의한 각 계수들을 보여준다. 격자 검증 결과 정확성과 효율성을 고려하여 C6의 격자 모델을 선택하였으며, 이는 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. Table 3은 본 연구에서 선택한 격자 모델에 대한 풍동 실험 및 다른 수치해석 결과와의 비교를 보여준다. 항력 계수 및 Strouhal 수 모두 실험 및 다른 수치해석 결과와 잘 일치하고 있다. Fig. 5는 무차원시간에 대한 양력 계수와 항력 계수를, Fig. 6은 교량 단면 주위의 순간 압력장을 나타낸다.

### 3. 유체유발 진동해석

#### 3.1 구조선형 운동방정식

물리영역에서 구조적 비선형성이 없다는 가정 하에, 감쇠를 고려한 탄성체의 운동방정식은 다음과 같이 전형적인 행렬형태로 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{F(t, u, \dot{u})\} \quad (4)$$

여기서,  $[M]$ 은 질량행렬,  $[C]$ 는 감쇠행렬,  $[K]$ 는 강성행렬이며,  $\{F\}$ 는 외력 벡터로 비선형 외력 항이 된다. 식 (4)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  $q_i(t)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )에 대하여 다음과 같은 선형변환을 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \{u(t)\} &= [\phi]\{q(t)\}, \{\dot{u}(t)\} \\ &= [\phi]\{\dot{q}(t)\}, \{\ddot{u}(t)\} = [\phi]\{\ddot{q}(t)\} \end{aligned} \quad (5)$$

위의 식 (5)를 식 (4)에 대입하고, 양변에  $[\phi]^T$ 를 취하면 다음과 같이 일반화된 좌표계에서의 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$[M_g]\{\ddot{q}(t)\} + [C_g]\{\dot{q}(t)\} + [K_g]\{q(t)\} = \{Q(t, q, \dot{q})\} \quad (6)$$

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

$$[M_g] = [\phi]^T [M] [\phi], [C_g] = [\phi]^T [C] [\phi], [K_g] = [\phi]^T [K] [\phi], \{Q(t)\} = [\phi]^T \{F(t)\} \quad (7)$$

$$Q(t)_i = \frac{1}{2} \rho U^2 \iint_S (C_{p_i}(x, y, t))$$

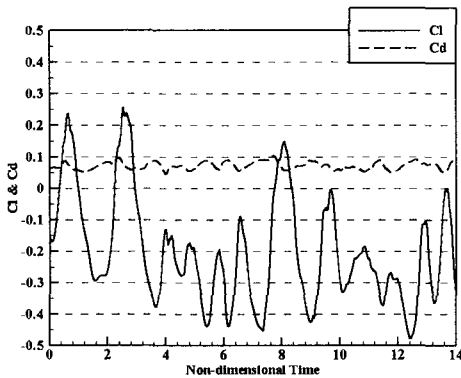


Fig. 5 Time responses of lift & drag coefficients



Fig. 6 Pressure contour

Table 3 Comparison of drag coefficient and Strouhal number

	$C_d$	$S_d$
Present study	0.070	0.120
Larsen et al.(1997) [2]	0.061	0.100-0.168
Taylor et al.(1999)	0.050	0.16-0.18
Selvam et al.(2001) [3]	0.062	0.140
Wind tunnel tests (1993) [1]	0.077	0.109-0.158

$$-C_{p_i}(x, y, t))\Psi_i(x, y)dxdy$$

위 식에서  $\Psi_i$ 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  $2\zeta i\omega_l[M_g]$  값을 적용하면 된다.

식 (6)의 적분을 용이하게 수행하기 위하여  $2n$ -차원의 상태공간 행렬 형태로 변환하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\{X(t)\} = [A]\{X(t)\} + [B]\{Y(t)\} \quad (8)$$

여기서, 행렬  $[A]$ ,  $[B]$  및 벡터  $\{X(t)\}$ ,  $\{Y(t)\}$ 는 다음과 같다.

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

$$[B] = \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & [M_g]^{-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\{X(t)\} = \begin{Bmatrix} \{q(t)\} \\ \{\dot{q}(t)\} \end{Bmatrix}, \{Y(t)\} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{Q(t)\} \end{Bmatrix}$$

$$Q(t)_i = \frac{1}{2} \rho U^2 \iint_S -\Delta C_p(n_x \Psi_{xi} + n_y \Psi_{yi} + n_z \Psi_{zi})dxdy$$

위 식에서  $i$ 는 가진 모드를 의미하며,  $\Psi$ 는 고유모드 벡터를,  $S$ 는 교량 구조물의 투영 면적이며,  $\rho$ 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 (8)은 유한차원 선형 미분방정식으로 엄밀해(analytical solution)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\{X(t)\} = [\Phi(t)]\{X(0)\} + \int_0^t e^{[A](t-\tau)} [B]\{Y(\tau)\}d\tau \quad (10)$$

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

### 3.2 3-자유도계 등가 공탄성 해석

래터럴(lateral), 히브(heave) 및 피치(pitch) 자유도가 있는 3-자유도계 등가(equivalent) 교량 단면은 3차원 교량의 동적 안정성에 대한 구조 단순화 모델로 공탄성 해석에 적용될 수 있다. 특히 구조 변수 및 공력 변수들이 상호 민감하게 연계되어 있는 공력탄성학적 동적 응답 문제에 있어서 정교한 해석 기법의 개발이나, 다양한 구조 매개 변수들의 영향에 대한 연구를 위해 매우 이상적인 연구모형을 제공할 수 있다.

Fig. 7에 래터럴, 히브 및 피치 자유도를 갖는 3-자유도계 등가 공탄성 시스템의 개념도를 제시하였다. 이에 대한 공탄성 방정식을 유도하면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$m\ddot{l} + g_l \dot{l} + k_l l = D(t) \quad (11)$$

$$m\ddot{h} + g_h \dot{h} + k_h h = L(t) \quad (12)$$

$$I\ddot{\alpha} + g_\alpha \dot{\alpha} + k_\alpha \alpha = M(t) \quad (13)$$

여기서,  $m$ 은 단면의 질량을,  $l$ 과  $h$  및  $\alpha$ 는 각각 단면의 래터럴, 히브 및 피치 자유도를 나타낸다.  $g_l$ 과  $g_h$  및  $g_\alpha$ 는 각각 래터럴, 히브 및 피치 방향에 대한 구조감쇠계수를,  $k_l$ 과  $k_h$  및  $k_\alpha$ 는 각각 래터럴축, 히브축 및 피치축의 스프링 강성을, 우변의  $D(t)$ 와  $L(t)$  및  $M(t)$ 는 비정상 항력과 양력 및 모멘트를 의미한다.  $I$ 는 단면의 피치축에 대한 단위 스패 길이당 관성 모멘트(moment of inertia)를 의미하며, 정의는 다음과 같다.

$$I = \int_c x^2 \rho dx \quad (14)$$

여기서,  $\rho$ 는 단위길이 당 교량 단면의 질량을 의미한다.

식 (11)~식 (13)을 무차원화 하기 위해 다음과 같은 정의를 도입한다.

$$\omega_l = \left(\frac{k_l}{m}\right)^{(1/2)}, \omega_h = \left(\frac{k_h}{m}\right)^{(1/2)}, \omega_\alpha = \left(\frac{k_\alpha}{m}\right)^{(1/2)},$$

$$\zeta_l = \frac{g_l}{2} (mk_l)^{(1/2)}, \zeta_h = \frac{g_h}{2} (mk_h)^{(1/2)},$$

$$\zeta_\alpha = \frac{g_\alpha}{2} (Ik_\alpha)^{(1/2)}, r_\alpha = \left(\frac{I}{mb^2}\right)^{(1/2)}, \mu = \frac{m}{\rho b^2},$$

$$U^* = \frac{U_\infty}{b\omega_a}, \quad \bar{\omega}_l = \frac{w_l}{w_a}, \quad \bar{\omega}_h = \frac{w_h}{w_a} \quad (15)$$

여기서,  $m$ 은 단위 두께 당 질량이며,  $b$ 는 반 시위길이이다. 공탄성 지배방정식 식 (11)~식 (13)은 2차 3계 선형 미분방정식이며, 식 (8)~식 (9)를 이용하여 상태공간 행렬 형태의 1차 6계 선형미분방정식 형태로 쓸 수 있다. 여기서, 행렬  $[M_g]$ ,  $[C_g]$ ,  $[K_g]$  및 벡터  $\{q(t)\}$ ,  $\{Q(t)\}$ 는 다음과 같다.

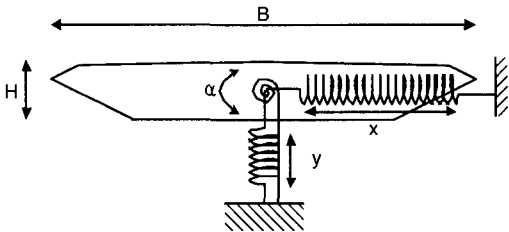


Fig. 7 Structural model of the GBEB section

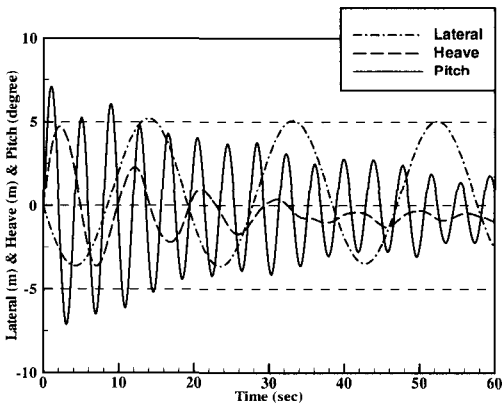


Fig. 8 Aeroelastic responses at U=37 m/s

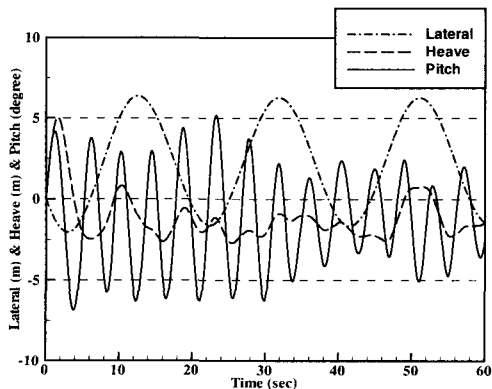


Fig. 9 Aeroelastic responses at U=64 m/s

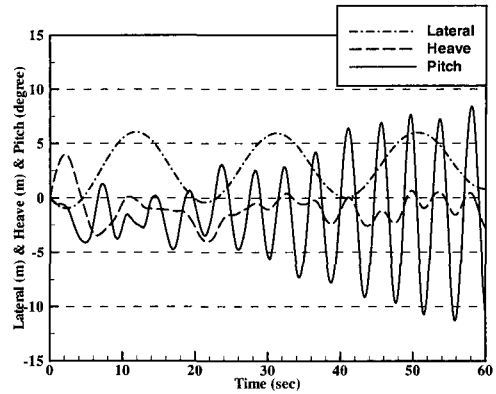


Fig. 10 Aeroelastic responses at U=69m/s

Table 4 Summary of results for flutter computations for GBEB suspension span

	$U$ (m/s)
Present study (3 DOF)	64 ~ 69
Selvam et al.(2001) [3]	65 ~ 72
Larsen et al.(1997) [2]	74
Frandsen et al.(1998)	50
Enevoldsen et al.(1999)	70 ~ 80
Wind tunnel tests (1993) [1]	70 ~ 74

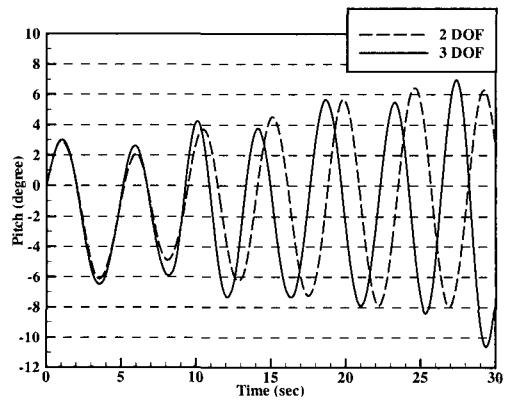


Fig. 11 Comparison of pitch responses at U=69 m/s

$$[M_g] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, [C_g] = \begin{bmatrix} \frac{g_l}{m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{g_h}{m} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{g_a}{I} \end{bmatrix}$$

$$[K_g] = \begin{bmatrix} \frac{k_l}{m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_h}{m} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_a}{I} \end{bmatrix}, q(t) = [l \ h \ a]^T$$

$$Q(t) = \left[ \frac{D(t)}{m} \quad \frac{L(t)}{m} \quad \frac{M(t)}{I} \right]^T \quad (16)$$

식 (10)을 적용하여 플러터 해석을 수행하였다. Fig. 8은  $U=37$  m/s, Fig. 9는  $U=64$  m/s, 그리고 Fig. 10은  $U=69$  m/s에서의 GBEB 중앙 경간 (suspension span)의 공탄성 응답을 나타낸다. 결과에서 알 수 있듯이, 중앙 경간의 래터럴 및 히브 응답은  $U=37\sim 69$  m/s의 속도 범위에서 플러터 발생을 보이지 않고 있다. 그러나 피치 응답에서는  $U=64$  m/s의 속도에서는 수렴응답을 나타내고 있으며,  $U=69$  m/s의 속도에서는 플러터가 발생하였다. 따라

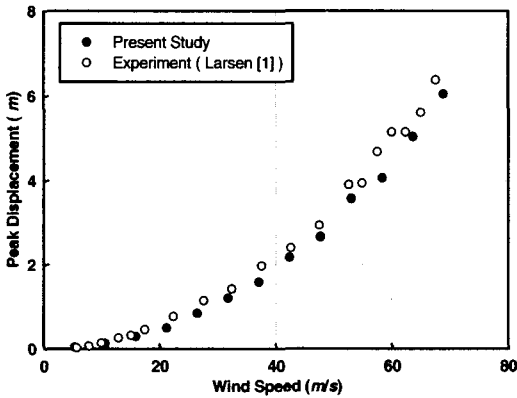


Fig. 12 Lateral peak response of GBEB

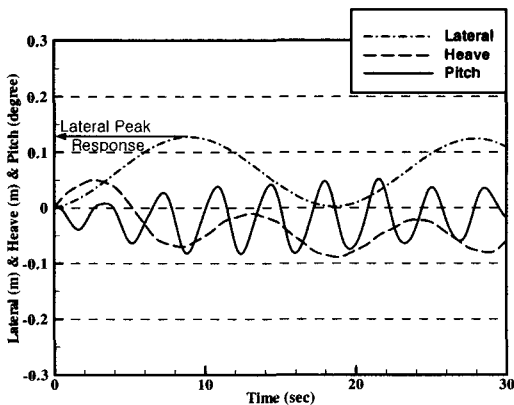


Fig. 13 Lateral peak response of GBEB at  $U=11$ m/s

서 GBEB 교량 단면의 플러터 임계 속도는 64~69 m/s의 구간에 있으며, 피치 응답으로 발생한다고 예측된다. Table 4의 다른 수치결과 및 풍동실험과의 비교에서 보는 바와 같이 플러터 예측 결과가 잘 일치하고 있다.

풍동 실험에서 예측한 임계 플러터 속도 구간은 70~74 m/s로 본 연구와 차이를 보이고 있지만, 이는 풍동 실험에 사용된 GBEB의 축소 모델이 실제 GBEB와 고유진동수에서 약간의 차이가 있기 때문이다. 교량 구조물의 임계 플러터 속도는 구조물의 고유진동수에 민감하다. 이는 참고문헌(5)에서 자세하게 설명하였다. 참고문헌(5)에서 알 수 있듯이, 풍동 실험에 사용된 구조 모델의 임계 플러터 속도는 69~73 m/s의 구간에 있으며, 피치 응답으로 발생하였다. 이는 풍동 실험 결과와 잘 일치한다.

Fig. 11은 플러터가 발생하는  $U=69$  m/s에서 2-자유도계 및 3-자유도계 교량 단면의 피치 응답을 비교하고 있다. 히브와 피치 자유도를 갖는 2-자유도계 교량 단면의 공탄성 방정식은 식 (12)~식 (13)과 같다. 본 연구에서 두 경우 모두 같은 히브 및 피치 고유진동수를 갖는 구조 모델을 사용하였으며, 초기 교란으로 같은 속도를 사용하였다. Fig. 11에서 알 수 있듯이, 래터럴 자유도를 추가한 3-자유도계 모델의 피치 응답의 진동수는 0.225 Hz로 2-자유도계 모델의 0.210 Hz보다 0.015 Hz 높은 응답을 나타내었다.

Fig. 12는 난류 흐름(turbulence flow)에 대한 GBEB의 버펫팅 반응을 나타낸다. 이는 변위 및 속도의 초기 교란이 주어지지 않을 때, 래터럴 자유도의 최대 변위 응답(peak response)이다. 해석은  $U=5\sim 69$  m/s의 속도 범위에서 수행되었으며, 난류 흐름에 대한 래터럴 자유도의 최대 변위 응답은 중앙 경간에 작용하는 항력, 즉 자유 흐름 속도의 제곱에 비례함을 보이고 있다. Fig. 13은  $U=11$  m/s에서 래터럴 자유도의 최대 변위 응답을 나타내고 있다. Fig. 12에서 알 수 있는 것처럼, 참고문헌(1)의 실험 결과와 래터럴 자유도의 최대 변위 응답이 잘 일치한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 3차원 교량 구조물의 구조 단순화

모델인 2차원 3-자유도계 교량 단면을 이용하여 공탄성 안정성을 검증하였다. 이를 위하여 FLUENT의 2차원 비압축성, 비정상 N/S 코드와 연계 시간적분법을 이용한 in-house 코드를 연계하여, 공기와 교량 구조물간의 상호작용에 따른 유체유발 진동해석을 수행하였다. 본 연구에서 GBEB의 임계 플러터 속도는 64~69 m/s 구간에 있으며, 피치 응답으로 플러터가 발생함을 예측하였다. 또한 2-자유도계 공탄성 시스템의 해석과 비교 결과, 플러터 발생시 3-자유도계의 피치 공탄성 진동수가 2-자유도계의 경우보다 조금 높음을 알 수 있었다. 마지막으로 3-자유도계 공탄성 시스템을 이용하여 교량 구조물의 버펫팅 응답을 얻었으며, 래터럴 자유도의 최대 변위 응답이 자유 흐름 속도의 제곱에 비례함을 확인하였다. 래터럴 자유도의 최대 변위 응답의 결과, 버펫팅은 구조 피로를 야기할 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 2003년도 과학기술부의 국가지정연구실 사업의 연구비 지원에 의해 수행된 연구결과의 일부이며 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Allan Larsen, 1993, "Aerodynamic Aspects of the Final Design of the 1624m Suspension Bridge across the Great Belt," J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 48, pp. 261~285.
- (2) Allan Larsen and Jens H. Walther, 1997, "Aeroelastic Analysis of Bridge Girder Sections Based on Discrete Vortex Simulations," J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 67 & 68, pp. 253~265.
- (3) R. Panneer Selvam and Suresh Govindaswamy, 2001, "A Report on Aeroelastic Analysis of Bridge Section Using Computer Modeling," a report for Mack Blackwell Transportation Center, pp. 1~109.
- (4) 장태진, 김동현, 이인, 2002, "MAV 안정화 설계를 위한 저속 유체유발 비선형 진동특성 연구", 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 11 호, pp. 873~881.
- (5) 박성종, 2004, "Navier-Stokes 방정식을 이용한 교량 구조물의 유체유발 진동해석", 한국과학기술원 석사학위논문.