

구조 강성에 따른 교량 구조물의 임계 플러터 속도 연구

Study of Critical Flutter Velocities of Bridge Girder Sections with Different Structural Stiffness

박성종* 권혁준** 김종윤** 이인† 한재흥**

Park, Seong-Jong Kwon, Hyuk-Jun Kim, Jong-Yun Lee, In Han, Jae-Heung

(논문접수일 : 2004년 2월 2일 ; 심사종료일 : 2004년 8월 3일)

요지

본 논문에서는 토목 구조물에 대한 바람의 영향을 알아보기 위하여 수치 기법으로 해석하였다. 시간이 긴 현수교는 바람에 의한 공력탄성학적 불안정성에 놓일 수 있으므로, 설계 시 공기력은 주요한 고려사항이며 공탄성 안정성은 반드시 확인되어야 한다. 풍속이 임계 플러터 속도를 넘어서면, 교량 구조물은 바람과 상호작용에 의한 플러터 현상으로 인해 붕괴된다. 교량 단면의 공탄성 해석을 위해 전산유체역학과 전산구조해석을 이용하였으며, Navier-Stokes 방정식을 사용하여 공기력을 구하였다. 본 연구에서는 구조 강성에 따른 교량 구조물의 임계 플러터 속도가 연구된다. 교량 단면의 임계 플러터 속도는 구조 강성의 변화에 민감함을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 현수교, 공탄성, 플러터, 구조 강성, 와류 흘림, 나비에-스톡스

Abstract

Numerical analysis of wind effects on civil engineering structures was performed. Aerodynamic effect often becomes a governing factor 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 aeroelastic 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. Navier-Stokes equations were 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. Critical flutter velocities were computed for bridges with different stiffness. It was confirmed that the critical flutter velocity of bridge girder section was sensitive to the change of structural stiffness.

keywords : suspension bridge, aeroelasticity, flutter, structural stiffness, vortex shedding, navier-stokes

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 과정에 의해 물체의 변위가 증가하는 경향이 나

타날 경우, 그 구조물은 공력탄성학(aeroelasticity)적으로 불안정한 상태에 놓이게 된다.

플러터(flutter)는 공력탄성학적 불안정 현상 중에서도 대표적인 유체유발 진동 현상에 해당된다. 플러터 불안정성은 불어오는 바람과 구조물의 상호작용에 의한 자기가진(self-excited) 힘에 의해 발생된다. 유동장 내에서 유체와

† 책임저자, 정회원 · 한국과학기술원 항공우주공학전공 교수
전화: 042-869-3717 ; Fax: 042-869-3710
E-mail: inlee@asdl.kaist.ac.kr

* 대우일렉트로닉스 HA연구소

** 한국과학기술원 항공우주공학전공

* 이 논문에 대한 토론을 2004년 12월 31일까지 본 학회에 보내주
시면 2005년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

구조물 사이에는 서로 같은 크기로 방향이 반대인 반력이 존재한다. 이에 따라 구조물의 진동은 와류 홀림(vortex shedding)과 동조될 수 있으며, 이때 대변위 진동을 유발하게 된다. 플러터 현상이 유발되면 순식간에 매우 위험한 구조 파손이 초래되므로 설계 시 필수적인 고려사항이 된다.

토목 구조물 중 현수교는 시간이 길어 바람에 의한 공력탄성학적 불안정 상태에 놓일 수 있으므로, 공탄성 해석은 설계에서 고려되어야 하는 주요한 척도이다. 풍속이 임계 플러터 속도를 넘어서면, 교량 구조물은 바람과의 상호작용으로 인하여 붕괴된다. 따라서 플러터 불안정성과 같은 공력탄성학적 응답은 시간이 긴 교량의 설계에서 중요한 관심사가 되었다. 현수교를 지나는 유동의 특성 및 플러터와 버펫팅에 대한 많은 풍동 실험이 이루어졌고,¹⁾ 근래에서 수치기법을 이용한 해석이 이루어지고 있다.^{2)~5)}

본 연구의 목적은 구조 강성에 따른 교량 단면의 임계 플러터 속도 변화를 관찰하는 것이다. 이를 위하여 2차원 비압축성, 비정상 N/S 코드와 연계 시간적분법에 기초한 in-house 코드를 연계하였으며, 히브(heave)와 피치(pitch)의 2-자유도계 교량 단면의 공탄성 시스템에 대한 플러터 해석을 수행하였다. 전산유체역학(CFD)에 기초하여 비정상 공기력을 구하였고, 전산구조역학(CSD)에 기초하여 교량 구조물의 응답을 얻어 교량 구조물의 플러터 해석을 수행하였다. 비정상 공기력은 Fluent Inc.의 FLUENT(Ver 6.1)를 이용하였으며, 탄성 운동 방정식은 연계 시간적분법을 이용하여 FLUENT의 UDF(User-Defined Function)을 프로그래밍하여 이를 FLUENT와 연계 해석하였다.

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.

$$\nabla \cdot \vec{u}^* = 0 \tag{1}$$

$$\frac{D\vec{u}^*}{Dt^*} = \nabla \frac{p^*}{\rho} + \nu \Delta \vec{u}^* \tag{2}$$

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_∞ 와 밀도 ρ , 대표 길

이 L 로 무차원화하였다.

$$\vec{u}^* \equiv \frac{\vec{u}}{V_\infty}, p^* \equiv \frac{p}{\rho_\infty V_\infty^2} \tag{3}$$

$\infty, x^* \equiv \frac{x}{L}, t^* \equiv \frac{t V_\infty}{L}$

2.2 선형화 및 차분

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 수치 오차를 효과적으로 감소시키기 위해 다중격자법(multi-grid method)을 함께 사용하였다.

공간 차분법으로는 격자 중심의 유한체적법(Finite Volume Method, 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

본 연구에서는 비정상 공기력 및 플러터 해석의 검증 모델로 GBEB(Great Belt East Bridge)의 girder section을 선택하였다. GBEB는 지간 길이 535m-1624m-535m의 3-지간 현수교로, 세계에서 두 번째로 긴 교량이다. GBEB는 많은 풍동실험 자료가 있으며, 근래에는 전산 풍공학을 이용한 연구가 시도되고 있다. 그림 1에는 GBEB 중앙 경간(suspension span)의 단면을 나타내고 있으며, 표 1에는 GBEB 중앙 경간의 구조 물성치를 나타내고 있다.

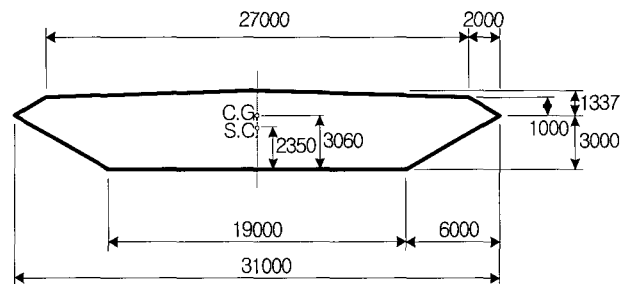


그림 1 GBEB 중앙 경간의 단면 (단위 m)

표 1 GBEB 중앙 경간의 구조 물성치

| 구조 물성 | GBEB 중앙 경간 |
|-------------------------------|--------------------|
| Mass (Kg/m) | 2.27×10^4 |
| Inertia (Kgm ² /m) | 2.47×10^6 |
| fh (Hz) | 0.100 |
| fa (Hz) | 0.272 |
| ζ (rel-to-crit) | 0.002 |

해석에 사용하는 격자 모델의 처음 격자 간격(spacing)은 코드 길이의 0.0005배이며, 전체 격자(cell) 개수는 46,488개이다. 그림 2에 계산 영역과 경계 조건을 나타내었다. 입구 경계에서 x 방향으로는 '1', y 방향으로는 '0'의 균일한 속도를 갖는다. 각 측면 경계에서는 미끄럼 경계 조건을 갖는다. 본 연구는 다른 수치 결과 및 풍동실험 결과와 비교를 위해 $Re_N=1 \times 10^5$ 에서 수행하였다.

본 연구의 공기력 및 플러터 해석에 사용하는 격자 모델은 삼각형과 사각형의 비정렬 격자(unstructured grid)를 사용하였으며, 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 교량 단면의 경계층 영역에는 사각형 격자를, 그 외 유동 영역에는 삼각형 격자를 사용하였다. 그림 3에서 알 수 있는 것처럼, 플

러터 해석 시 격자의 부서짐(negative volume cell)을 방지하기 위하여 유동 영역(zone)을 두개로 나누어, 구조물 및 구조물을 포함한 내부 영역이 함께 움직이도록 하였다.

공기력 해석 결과의 검증을 위하여, 다음과 같이 정의되는 항력 계수(C_d)와 Strouhal 수(S_t)를 비교하였다.

$$C_d = \frac{F_x}{0.5\rho V^2 BW} \tag{4}$$

$$S_t = \frac{H}{TV} \tag{5}$$

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

표 2는 자유 흐름 속도 $V=53m/s$ 에서 공기력 해석에 의한 각 계수들의 풍동실험 및 다른 수치해석 결과와의 비교를 보여준다. 항력 계수 및 Strouhal 수 모두 실험 및 다른 수치해석 결과와 잘 일치하고 있다. 그림 5는 무차원시간에 대한 양력 계수와 항력 계수를, 그림 6은 교량 단면 주위의 순간 압력분포(pressure contour)를 나타낸다. 그림 7과 그림 8은 교량 단면 주위의 순간 속도 벡터분포(velocity vector contour)와 후류(wakes)의 확대 형상을 나타낸다.

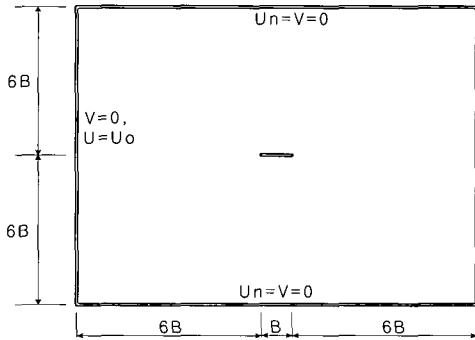


그림 2 계산 영역과 경계 조건

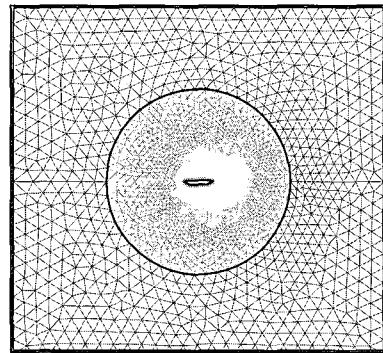


그림 3 격자 모델

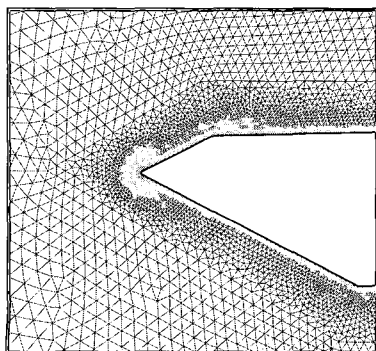


그림 4 격자 모델의 확대 형상

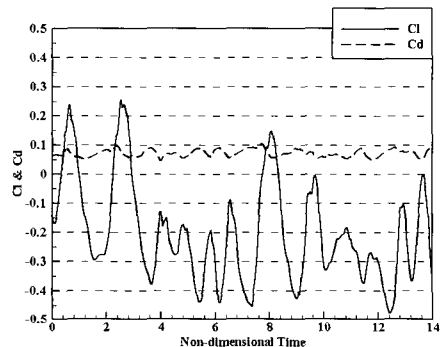


그림 5 항력 및 양력 계수의 시간 응답

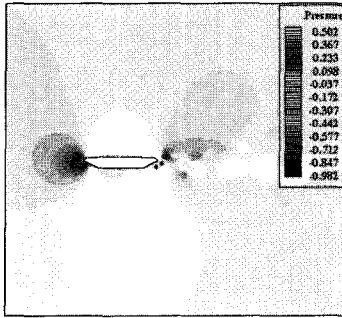


그림 6 순간 압력분포

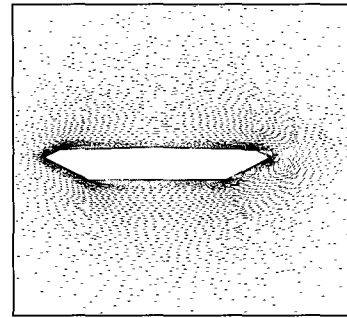


그림 7 순간 속도 벡터분포

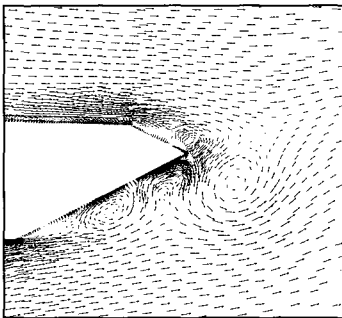


그림 8 속도 벡터분포의 확대 형상

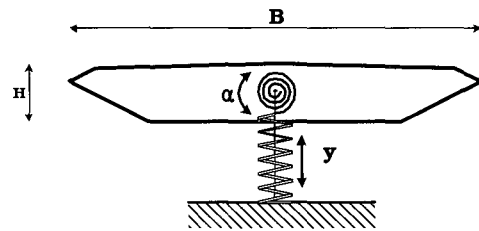


그림 9 2-자유도계 등가 공탄성 시스템

표 2 비정상 공기력 결과 비교 (평균값)

| | C_d | S_i |
|-------------------------------|-------|-------------|
| Present Study | 0.070 | 0.120 |
| Larsen 등 (1997) ²⁾ | 0.061 | 0.100-0.168 |
| Taylor 등 (1999) | 0.050 | 0.16-0.18 |
| Selvam 등 (2001) ³⁾ | 0.062 | 0.140 |
| 풍동실험 (1993) ¹⁾ | 0.077 | 0.109-0.158 |

3. 유체유발 진동해석

3.1 공탄성 방정식 및 해석

히브(heave)와 피치(pitch) 자유도가 있는 2-자유도계 등가(equivalent) 교량 단면은 3차원 교량의 동적 안정성에 대한 구조 단순화 모델로 공탄성 해석에 적용될 수 있다.

그림 9에 히브와 피치 자유도를 갖는 2-자유도계 등가 공탄성 시스템의 개념도를 제시하였다. 이에 대한 공탄성 방정식을 유도하면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$m\ddot{h} + g_h\dot{h} + k_h h = L(t) \tag{6}$$

$$I\ddot{\alpha} + g_\alpha\dot{\alpha} + k_\alpha \alpha = M(t) \tag{7}$$

여기서, m 은 단면의 질량을, h 와 a 는 각각 단면의 히브와 피치 자유도를 나타낸다. g_h 와 g_α 는 각각 히브와 피치 방향에 대한 구조감쇠계수를, k_h 와 k_α 는 각각 히브축과 피치축의 스프링 강성을, 우변의 $L(t)$ 와 $M(t)$ 는 비정상 양력과 모멘트를 의미한다. I 는 단면의 피치축에 대한 단위 스팬 길이당 관성 모멘트(moment of inertia)를 의미한다.

식(6)~식(7)을 다음과 같이 전형적인 행렬형태로 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{F(t, u, \dot{u})\} \tag{8}$$

여기서, $[M]$ 은 질량행렬, $[C]$ 는 감쇠행렬, $[K]$ 는 강성행렬이며, $\{u\}$ 는 변위 벡터, $\{F\}$ 는 비선형 외력 벡터로 다음과 같다.

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} g_h & 0 \\ 0 & g_\alpha \end{bmatrix}, [K] = \begin{bmatrix} k_h & 0 \\ 0 & k_\alpha \end{bmatrix}$$

$$u\{t\} = [h \ \alpha]^T \tag{9}$$

$$F\{t\} = [L(t) \ M(t)]^T$$

공탄성 지배방정식인 식(6)~식(7)은 다음과 같은 상태공간 방정식 형태로 쓸 수 있다.

$$\{\dot{X}(t)\} = [A]\{X(t)\} + [B]\{Y(t)\} \tag{10}$$

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

$$\begin{aligned}
 [A] &= \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \\
 [B] &= \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & [M]^{-1} \end{bmatrix} \\
 \{X(t)\} &= \begin{Bmatrix} \{u(t)\} \\ \{\dot{u}(t)\} \end{Bmatrix}, \{Y(t)\} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{F(t)\} \end{Bmatrix} \\
 F(t)_i &= \frac{1}{2} \rho U^2 \int_S (C_{pL} - C_{pV}) dx dy
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

위 식에서 i 는 가진 모드를 의미하며, S 는 교량 구조물의 투영 면적, ρ 는 공기의 밀도, U 는 자유흐름의 속도를 의미한다. 일반화된 외력항 $F(t)$ 에서 C_p 는 비정상 공기력 해석에 의한 결과이다.

대부분의 경우에 있어서 $[A]$, $[B]$ 행렬은 상수행렬이 된다. 위의 식(10)은 유한차원 선형 미분 방정식으로 엄밀해(analytical solution)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\{X(t)\} = [\Phi(t)]\{X(0)\} + \int_0^t e^{[A](t-\tau)} [B]\{Y(\tau)\} d\tau \tag{12}$$

여기서, 상태전이 행렬인 $[\Phi(t)] = e^{[A]t}$ 는 일반적으로 행렬 지수 함수의 충분한 수의 시리즈 전개를 함으로써 수치에러가 거의 없는 정확한 계산이 가능하다. 보다 자세한 수식은 참고문헌 6)에 제시되어 있다.

2-자유도계 공탄성 지배방정식인 식(6)~식(7)에 초기 교란(initial disturbance)으로 임의의 속도를 적용하여 플러터 해석을 수행하였다. 그림 10은 $U=37m/s$, 그림 11은 $U=66m/s$, 그림 12는 $U=69m/s$ 에서의 GBEB 중앙 경간(suspension span)의 히브와 피치에 대한 공탄성 응답을 나타낸다. 결과에서 알 수 있듯이, 중앙 경간의 히브 응답은 $U=37\sim 69m/s$ 의 속도 범위에서 플러터 발생을 보이지 않고 있다. 그러나 피치 응답에서는 $U=66m/s$ 의 속도에서는 중립 응답을 나타내고 있으며, $U=69m/s$ 의 속도에서는 발산 응답을 보이고 있다. 따라서 GBEB의 임계 플러터 속도는 $66\sim 69m/s$ 의 구간에 있으며, 피치 응답으로

발생한다고 예측된다. 표 3에 제시된 다른 수치결과 및 풍동실험과의 비교에서 알 수 있듯이 플러터 예측 결과가 잘 일치하고 있다. 표 4는 참고문헌[3]의 피치 공탄성 응답과 진동수 비교를 나타내고 있으며, 공탄성 진동수도 잘 일치하고 있다.

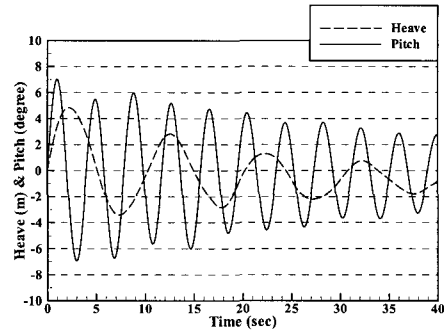


그림 10 $U=37m/s$ 에서 공탄성 응답

표 3 GBEB 단면의 임계 플러터 속도 비교

| | U (m/s) |
|-------------------------------|-----------|
| Present Study | 66~69 |
| Selvam 등 (2001) ³⁾ | 65~72 |
| Larsen 등 (1997) ²⁾ | 74 |
| Frandsen 등 (1998) | 50 |
| Enevoldsen 등 (1999) | 70~80 |
| 풍동실험 (1993) ¹⁾ | 70~74 |

표 4 히브 응답의 공탄성 진동수 비교

| | $U=37m/s$ | $U=69m/s$ |
|-------------------------------|-----------|-----------|
| Present Study | 0.26Hz | 0.21Hz |
| Selvam 등 (2001) ³⁾ | 0.26Hz | 0.20Hz |

풍동실험[1]에서 예측한 임계 플러터 속도 구간은 $70\sim 74m/s$ 로 본 연구와 차이를 보이고 있다. 이는 표 5에서 알 수 있는 것처럼, 풍동실험에 사용된 GBEB의 축소 모델이

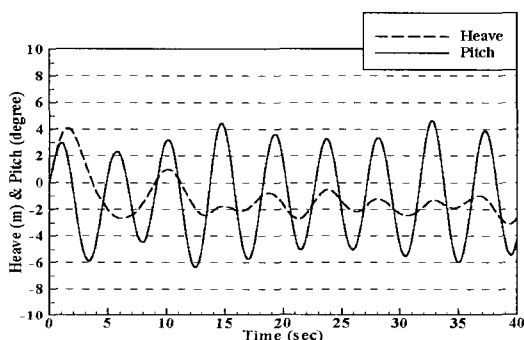


그림 11 $U=66m/s$ 에서 공탄성 응답

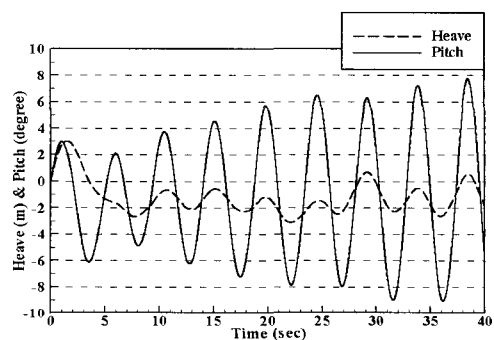


그림 12 $U=69m/s$ 에서 공탄성 응답

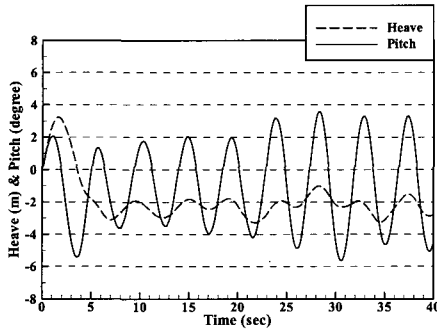


그림 13 $U=69m/s$ 에서 공탄성 응답 (풍동실험 모델)

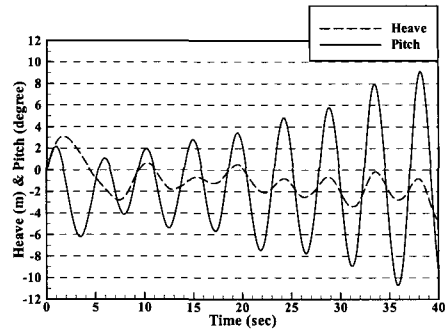


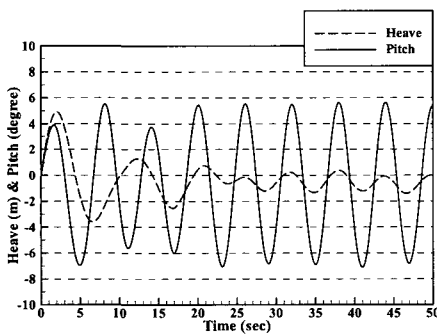
그림 14 $U=73m/s$ 에서 공탄성 응답 (풍동실험 모델)

실제 GBEB와 고유진동수에서 약간의 차이가 있기 때문이다. 교량 구조물의 임계 플러터 속도는 구조물의 고유진동수에 민감하다. 이는 3.2절에서 자세하게 설명하였다. 풍동실험에 사용된 구조 모델의 임계 플러터 속도를 구하기 위하여 공탄성 해석을 수행하였다. 그림 13과 그림 14는 풍동실험에 사용된 구조 모델의 각각 $U=69m/s$ 와 $U=73m/s$ 에서 공탄성 응답을 나타내고 있다. 예상했던 것처럼 $U=69m/s$ 에서는 플러터 발생을 보이지 않고 있으며, $U=73m/s$ 에서는 피치 응답에서 발산 응답을 보이고 있다. 따라서 풍동실험에 사용된 구조 모델의 임계 플러터 속도는

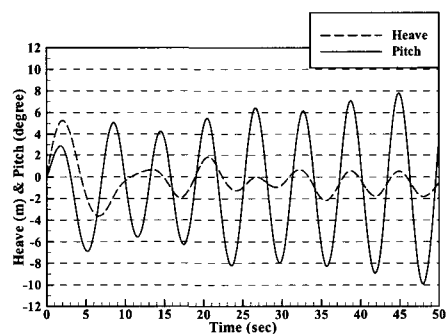
69~73m/s의 구간에 있으며, 본 연구의 플러터 예측 결과는 실험 결과와도 잘 일치함을 알 수 있다.

표 5 풍동실험 결과와 임계 플러터 속도 비교

| | f_h (Hz) | f_a (Hz) | U (m/s) |
|-------------------------|------------|------------|-----------|
| Present Study (GBEB) | 0.100 | 0.272 | 66~69 |
| Present Study (풍동실험 모델) | 0.100 | 0.278 | 69~73 |
| 풍동실험 | 0.100 | 0.278 | 70~74 |

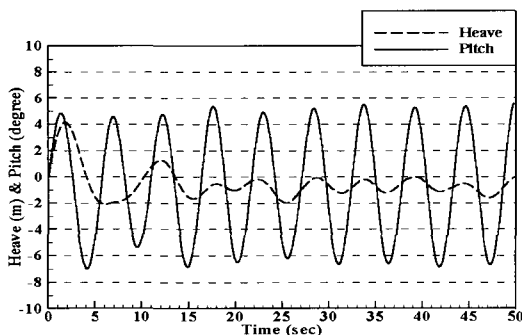


(a) $U=42m/s$ 에서 공탄성 응답

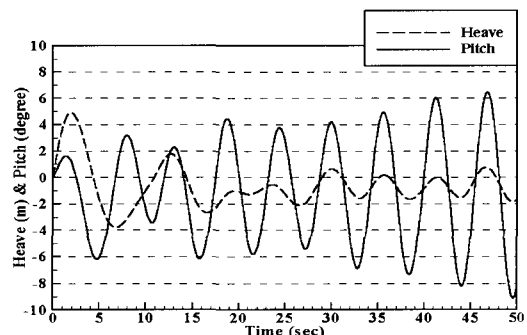


(b) $U=45m/s$ 에서 공탄성 응답

그림 15 구조 모델 C2의 공탄성 응답

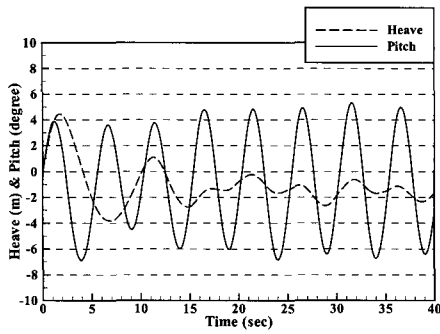


(a) $U=48m/s$ 에서 공탄성 응답

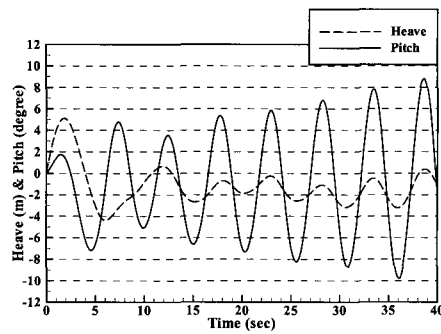


(b) $U=53m/s$ 에서 공탄성 응답

그림 16 구조 모델 C3의 공탄성 응답

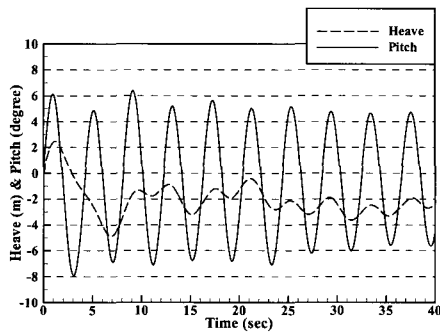


(a) $U=57m/s$ 에서 공탄성 응답

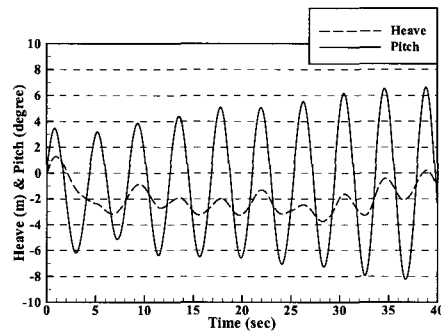


(b) $U=61m/s$ 에서 공탄성 응답

그림 17 구조 모델 C4의 공탄성 응답



(a) $U=69m/s$ 에서 공탄성 응답



(b) $U=74m/s$ 에서 공탄성 응답

그림 18 구조 모델 C5의 공탄성 응답

GBEB는 주변의 바람 환경을 충분히 검토하여 38.9m/s의 설계 풍속(design wind speed)으로 건설되었다. 그리고 설계에서 고려된 임계 플러터 속도는 60m/s이었다. 본 연구에서 알 수 있는 것처럼, GBEB임계 속도 66~69m/s의 구간에서 피치 응답으로 플러터가 발생하므로 설계 범위 내에서 공탄성 안정성을 갖는 것을 확인하였다.

3.2 구조 강성에 따른 임계 플러터 속도 연구

히브와 피치의 2-자유도계 공탄성 시스템을 이용하여 피치의 구조 강성, 즉 고유진동수에 따른 임계 플러터 속도의 변화를 관찰하였다. 같은 히브 고유진동수를 갖지만, 피치의 고유진동수가 다른 5가지 구조 모델에 해석을 수행하였으며, 이를 비교하였다. 각 구조 모델의 고유진동수는 표 6에 나타내었다. C1은 GBEB를 나타내고 있다. C2, C3 및 C4의 구조 모델은 C1의 경우보다 피치의 고유진동수가 작으며, C5의 구조 모델은 C1에 비해 큰 고유진동수를 갖는다.

C1에 비해 피치의 고유진동수가 약 30% 감소한 C2의 공탄성 응답은 그림 15에 나타내었다. 그림 15(a)의 $U=42m/s$ 의 속도에서는 피치 응답에서 중립 응답을 나타내고 있다. 그러나 그림 15(b)의 $U=45m/s$ 의 속도에서는

피치 응답이 발산하였다. 따라서 C2의 구조 모델은 임계속도 42~45m/s의 구간에서 피치 응답으로 플러터가 발생하는 것으로 예측할 수 있다.

표 6 구조 물성치 및 임계 플러터 속도 비교

| CASE | f_h | f_a | U (m/s) |
|-----------|--------------|----------------|-----------|
| C1 (GBEB) | 1 (0.100) | 1 (0.272Hz) | 66~69 |
| C2 | 1 | 0.707 | 42~45 |
| C3 | 1 | 0.806 | 48~53 |
| C4 | 1 | 0.894 | 57~61 |
| C5 | 1 | 1.095 | 69~74 |

C1에 비해 피치의 고유진동수가 약 20% 감소한 C3의 공탄성 응답은 그림 16에 나타내었다. 그림 16(a)의 $U=48m/s$ 의 속도에서는 피치 응답에서 중립 응답을 나타내고 있다. 그러나 그림 16(b)의 $U=53m/s$ 의 속도에서는 응답이 발산하였고, 히브에서는 플러터 응답을 보이지 않고 있다. 따라서 C3의 구조 모델은 임계속도 48~53m/s의 구간에서 피치 응답으로 플러터가 발생하는 것으로 예측할 수 있다.

C1에 비해 피치의 고유진동수가 약 10% 감소한 C4의 공탄성 응답은 그림 17에 나타내었다. 그림 17(a)의 $U=57m/s$ 의 속도에서는 피치 응답에서 중립 응답을 나타내고 있다. 그러나 그림 17(b)의 $U=61m/s$ 의 속도에서 피치 응답이 발산하였고, 히브에서는 플러터 응답을 보이지 않고 있다. 따라서 C4의 구조 모델은 임계속도 57~61m/s의 구간에서 피치 응답으로 플러터가 발생하는 것으로 예측할 수 있다.

C1에 비해 피치의 고유진동수가 약 10% 증가한 C5의 공탄성 응답은 그림 18에 나타내었다. 그림 18(a)의 $U=69m/s$ 의 속도에서는 피치 응답에서 중립 응답을 나타내고 있다. 그러나 그림 18(b)의 $U=74m/s$ 의 속도에서 피치 응답이 발산하였고, 히브에서는 플러터 응답을 보이지 않고 있다. 따라서 C5의 구조 모델은 임계속도 69~74m/s의 구간에서 피치 응답으로 플러터가 발생하는 것으로 예측할 수 있다.

본 연구를 통하여 GBEB와 같은 형상의 모델에서는 피치의 구조 강성, 즉 고유진동수가 감소함에 따라 교량 구조물의 임계 플러터 속도는 낮아지며, 반대로 피치의 고유진동수가 증가함에 따라 교량 구조물의 임계 플러터 속도는 높아짐을 관찰할 수 있다. 위의 경우를 자세히 관찰하면 피치의 고유진동수 증감비와 임계 플러터 속도는 비례관계가 있다는 것을 관찰할 수 있다. C2, C3, C4는 C1에 비해 각각 약 36%, 25%, 13% 임계 플러터 속도가 감소하였다. C5는 C1에 비해 약 6% 임계 플러터 속도가 증가하였다. 따라서 본 형상의 모델에서는 피치의 고유진동수를 증가시키면 교량 구조물의 임계 플러터 속도를 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 3차원 교량 구조물의 구조 단순화 모델인 2차원 2-자유도계 교량 단면을 이용하여 플러터 해석을 수행하였다. 이를 위하여 FLUENT의 2차원 비압축성, 비정상 Navier-Stokes 코드와 연계 시간적분법을 이용한 in-house 코드를 연계하여, 공기와 교량 구조물간의 상호 작용에 따른 유체유발 진동해석을 수행하였다. 비정상 공기력 및 플러터 해석의 검증으로 GBEB의 중앙 경간에 대하여 해석을 수행하였으며, 본 연구의 해석 결과는 다른 수치 해석 결과 및 풍동실험 결과와 잘 일치하였다. 본 연구에서 GBEB의 임계 플러터 속도는 66~69m/s 구간에 있으며,

피치 응답으로 플러터가 발생함을 예측하였다. 또한 교량 구조물의 구조 강성에 따른 임계 플러터 속도 연구를 통하여 교량 구조물의 임계 플러터 속도는 피치의 구조 강성, 즉 고유진동수에 민감하다는 것을 알 수 있었다. 피치의 고유진동수 증감비에 비례하여 임계 플러터 속도도 증감하는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 모델의 경우 피치의 고유진동수를 증가시키면 교량 구조물의 임계 플러터 속도를 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. Larsen, A., "Aerodynamic aspects of the final design of the 1624m suspension bridge across the Great Belt", *J. of Wind Engineering and Industrial aerodynamics*, Vol. 48, 1993, pp. 261~285
2. Larsen, A. and Walther, J. H., "Aeroelastic analysis of bridge girder sections based on discrete vortex simulations", *J. of Wind Engineering and Industrial aerodynamics*, Vol. 67, 1997, pp. 253~265
3. Selvam, R. P. and Govindaswamy, S., "A Report on Aeroelastic Analysis of Bridge Section Using Computer Modeling," *A Report for Mack Blackwell Transportation Center*, 2001, pp. 1~109
4. 박성중, 권혁준, 유재한, 이 인, 한재홍, "Navier-Stokes 방정식을 이용한 교량 구조물의 공탄성 해석," 한국전산구조공학회 가을학술발표회 논문집, 2003, pp. 1~109
5. 박성중, "Navier-Stokes 방정식을 이용한 교량 구조물의 유체유발 진동해석," 한국과학기술원 석사학위논문, 2004
6. Kim, D. H. and Lee, I., "CFD-Based Matched-point Transonic and Supersonic Flutter Computations Using a Modified TSD Equation," *Computational Fluid Dynamics Journal*, Vol.11, No.1, 2002, pp.35~49.