

PCCAP을 이용한 장대 사장교의 버페팅 해석

Beffeting Analysis of Long Span Cable-stayed Bridge using PCCAP

유원진* 이석용** 남효승*** 이완수****

Yu, Won-Jin Lee Seok-Yong Nam Hyo-Seung Lee Wan-Soo

ABSTRACT

In this study, a time domain analysis is presented for investigation on the buffeting response of cable-stayed bridge during both erection and completion stages. The main span length and width of deck are 520 m and 15.1m, each. Since the ratio of span over width is 34.44, aerodynamic stability of the bridge during erection is expected to dominate the safety of the bridge in construction stage. Several conclusions regarding different construction stages and temporary wind cables are obtained.

1. 서 론

장지간을 가지는 교량은 다른 형태의 교량에 비하여, 주형의 휨강성과 비틀 강성이 매우 작다. 따라서 구조물의 고유진동주기가 매우 길어져 풍하중에 대하여 매우 민감하게 거동하고 경우에 따라서는 매우 큰 진동을 일으키게 되므로 사장교의 해석시에는 이들 동적하중에 대한 구조물의 거동과 안전성을 면밀히 검토하여야 한다.

바람의 난류성에 기인하여 구조물에 불규칙적인 변동풍기력이 작용할 때 발생하는 강제진동현상을 버페팅 혹은 거스트 응답이라고 한다. 이 진동현상은 대기류와 같이 난류성을 포함한 기류내에서는 어떠한 구조물이건, 어떠한 풍속영역이건간에 발생할 수 있다는 점이 다른 진동현상과 다른 점이다. 사장교와 같은 장대 교량의 경우에는 버페팅에 의한 동적인 하중효과를 거스트 계수로 적용시켜 반영하는 간단한 방법을 사용하기도 한다.

버페팅 해석은 삼성물산 건설기술연구소에서 개발한 PCCAP을 사용하였다. PCCAP은 강, 콘크리트, 혹은 두 재료의 합성 및 복합 구조로 구성된 사장교 해석 프로그램이다. 재료 및 기하 비선형을 고려할 수 있으며 최적장력 결정, 영향선해석, 지진 및 바람에 대한 동적 해석, 비선형 시공단계 해석, 캠버 산정, 시공시 오차보정 기능 등을 갖추고 있다. 단면의 항력, 양력, 모멘트 계수 및 그들의 기울기는 풍동실험을 통하여 구하였고, 플로터 계수들은 참고문헌[1]에 수록된 단면 중 가장 유사한 것을 근거로 하여 선정하였다.

2. 버페팅 해석

2.1 교량 개요

- * 정회원 · 삼성물산 기술연구소 선임연구원
- ** 삼성물산 토목사업본부 차장
- *** 삼성물산 기술연구소 전임연구원
- **** 정회원 · 삼성물산 기술연구소 수석연구원

해석에 사용된 교량은 돌산~화태간 연도교 T/K 설계안으로 삼성물산에서 제안한 것이다. 설치 위치는 여수시 돌산도 남쪽으로서 태풍이 자주 통과하는 지역이다. 총 교장 1,360m중 사장교는 1,120m이고 경간구성은 90+210+520+210+90으로 5경간 연속 대칭 사장교이다. 사장재는 2면식 semi fan형이고 주탑의 형상은 내풍성을 증대시키기 위해 역Y형을 사용하였다. 중앙경간의 길이가 510m인 데 비해 교폭은 15.1m에 불과하여 변장비가 33.8에 달하는 협폭 사장교이다. 따라서 교량 설계시 내풍안정성을 증대시키는 데에 역점을 두었으며 보강형 역시 바람에 유리한 유선형 박스 거더이다. 보강형 단면은 그림 1과 같다.

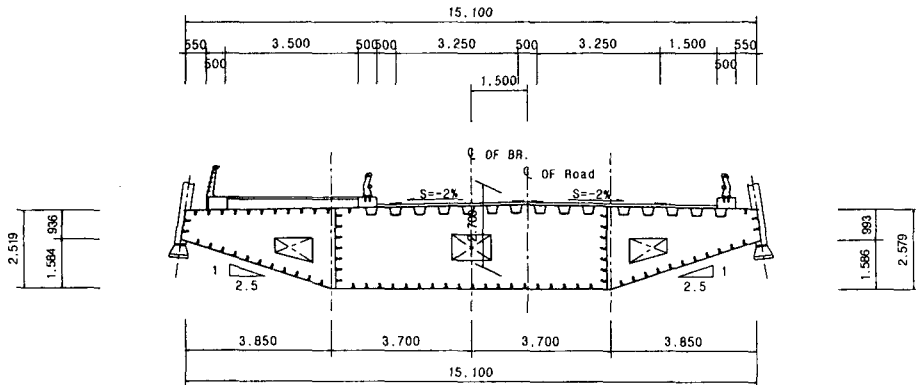


그림 1. 유선형 강상판 박스 거더

그림 1의 단면에 대해 $\pm 3, 0$ 도에 대해 풍동실험을 한 결과 풍속 80m/s까지 연직 및 비틀림 와류진동이 발생하지 않았으며 +3도인 경우에만 풍속 70m/s 이상에서 비틀림 플로터가 발생하였다. 따라서 시공중 및 완성된 교량에서 와류진동이나 플로터는 발생하지 않는 것으로 판단된다. 완성계에 대한 3차원 실험에서는 모형의 교축 직각방향 고유진동수가 너무 높아서 횡방향 변위는 검토에서 제외하였으며 연직방향으로 설계풍속에서 56cm 만 큼의 버페팅 변위가 발생하는 것으로 평가되었다.

2.2 해석 조건

해석대상 교량은 중앙경간장이 520m에 달하면서도 차선이 2차선에 불과하여 교량폭이 협소하기 때문에 완공 후 사용 중의 내풍안정성 뿐만 아니라 가설중에 발생할 수 있는 풍공학적 문제점들을 세심하게 점검하여야 한다. 본 연구에서는 시공중 3단계에 대하여 내풍 케이블의 유무 및 완성계 상태에 대하여 자려진동을 포함한 시간 영역에서의 버페팅 해석을 수행하였다. 시공중 3단계는 구조계가 급격히 변화하는 단계를 선정하였으며 아래와 같다.

- Stage 1 : 케이블이 주탑으로부터 7번째까지 가설되었을 때로서 내풍케이블이 설치되는 시점.
- Stage 2 : 측경간에서 기존 대불록으로 가설된 구간과 주탑으로부터 캔틸레버로 시공되어 온 구간이 폐합되는 시점.
- Stage 3 : 사장교 모든 구간이 가설되고 중앙경간 폐합만 남은 시점

가설단계에서 교량의 내풍안정성을 증대시키기 위해 내풍 케이블을 설치하는 경우도 검토하였다. 내풍 케이블

은 주탑으로부터 7번째 사장재(총 16개)가 설치된 직후 데크에 설치하되 횡방향 변위를 억제하기 위해 20도와 45도 경사를 가지고 설치하는 경우를 가정하였다.

해석에 사용되는 플로터 계수와 Rayleigh damping 계수들을 구하기 위해 각 시공단계별 고유진동해석을 수행하였다. 각 시공단계별 고유진동수 해석 결과는 표 1과 표 2와 같다. 표 2에서 케이블이 있는 경우의 모드 형상은 45도로 케이블을 배치한 경우이며, 완성계의 모드 형상은 Stage 3의 모드 형상과 유사하다.

표 1. 시공단계별 고유진동수

| 시공단계 | 케이블 | 고유진동수(Hz) | | |
|--------|---------|-----------|--------|-------|
| | | 연직(수직) | 교직(수평) | 비틀 |
| 완성계 | 케이블 없음 | 0.281 | 0.220 | 1.161 |
| Stage1 | 케이블 없음 | 0.064 | 0.580 | 2.145 |
| | 20도 케이블 | 0.465 | 0.722 | 3.365 |
| Stage2 | 45도 케이블 | 0.460 | 0.848 | 2.657 |
| | 케이블 없음 | 0.058 | 0.272 | 1.525 |
| Stage3 | 20도 케이블 | 0.580 | 0.374 | 2.982 |
| | 45도 케이블 | 0.568 | 0.621 | 2.736 |
| Stage3 | 케이블 없음 | 0.270 | 0.163 | 1.226 |
| | 20도 케이블 | 0.352 | 0.213 | 1.746 |
| | 45도 케이블 | 0.349 | 0.315 | 1.795 |

표 2. 시공단계별 모드 형상

| 케이블 없음 | Stage1 | Stage2 | Stage3 |
|--------|--------|--------|--------|
| 연직 | | | |
| 교직 | | | |
| 비틀 | | | |
| 케이블 있음 | Stage1 | Stage2 | Stage3 |
| 연직 | | | |
| 교직 | | | |
| 비틀 | | | |

고유진동수 해석결과로부터 알 수 있듯이 중앙경간 폐합직전(stage3)와 폐합후는 연직 및 비틀 강성은 큰 차이가 없고 교축직각방향만 상대적으로 강성이 커졌다. 중앙경간에서 폐합이 되어 있지 않기 때문에 변위는 더 크

게 발생할 것이다.

교량이 가설되어 가는 도중 교직방향 및 비틀 방향 강성은 주탑으로부터의 거리가 멀어짐에 따라 점점 작아지게 된다. 또한 주탑에서 교축방향의 회전변위가 억제되기 때문에 측경간을 폐합하기 직전(Stage2)과 직후의 비틀 진동수는 거의 차이가 나지 않을 것이다. 그러나 7번째 케이블가설(Stage1) 및 측경간 폐합직전(Stage2)의 연직 진동모드는 보고서에서 볼 수 있는 바와 같이 주탑의 하단을 지점으로 하여 캔틸레버 보 전체가 회전하는 모양으로 마치 강체회전 모드처럼 보인다. 이 모드의 연직 고유진동수는 대단히 낮아서 각 stage에서 0.064, 0.058Hz이다. 이 낮은 고유진동수는내풍 케이블을 설치(20도)함에 따라 급격히 증가하여 각각 0.465, 0.580Hz이다. 또한 사장교 전체가 회전하는 진동모드는 제거된다.

2.3 버페팅 해석 이론

교량의 거동에 영향을 미치는 풍하중으로는 크게 정상풍하중과 비정상 풍하중으로 분류할 수 있다. 이 중에서 교량의 내풍설계시에는 각각의 경우에서 항력, 양력 및 모멘트 만을 고려하는 것이 일반적이다.

정상풍하중은 바람이 작용하는 경우 교량의 평형상태를 구하는 데 사용된다. 이 때 풍속은 시간과 공간에 대해서 일정하다고 가정한다. 단위 지간당의 양력(L), 항력(D), 및 모멘트(M)은 다음과 같다. 여기서 C_L , C_D , 및 C_M 은 각각 양력, 항력 및 모멘트 계수로서 양각의 함수이며 B는 교량의 폭, A는 바람의 연직방향으로의 투영면적, α 는 영각이다. 또한 ρ 는 공기밀도, \bar{U} 는 교량 높이에서의 수평방향 평균 풍속이다.

$$L = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 B \left[C_L(0) + \frac{\partial C_L(0)}{\partial \alpha} \cdot \alpha \right]$$

$$D = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 A \left[C_D(0) + \frac{\partial C_D(0)}{\partial \alpha} \cdot \alpha \right]$$

$$M = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 B \left[C_M(0) + \frac{\partial C_M(0)}{\partial \alpha} \cdot \alpha \right]$$

비정상 풍하중은 난류성 기류 및 교량의 움직임, 와류현상 등에 의해서 발생되며 난류성 기류에 기인하는 버페팅 하중과 교량의 움직임으로 인한 자력진동하중(self-excited force)으로 분류할 수 있다. 이 때 와류의 영향은 풍동실험을 통해 자력진동하중항으로 포함된다. 버페팅 하중은 교량의 움직임과 무관하다고 가정하면 비정상 풍하중은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$L(t) = L_{SE}(t) + L_B(t)$$

$$D(t) = D_{SE}(t) + D_B(t)$$

$$M(t) = M_{SE}(t) + M_B(t)$$

여기서 아래 첨자 SE는 self-excited 항을, B는 buffeting 항이며 각 항은 다음과 같다.

$$L_{SE}(t) = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 (2B) \left[KH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^* \alpha \right]$$

$$D_{SE}(t) = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 (2A) \left[KP_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KP_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 P_3^* \alpha \right]$$

$$M_{SE}(t) = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 (2B^2) \left[KA_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^* \alpha \right]$$

$$L_b(t) = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 B \left[C_L(0) \left\{ 1 + \frac{2u(t)}{U} \right\} + \left\{ \frac{dC_L(0)}{d\alpha} + \frac{A}{B} C_D(0) \right\} \frac{w(t)}{U} \right]$$

$$D_b(t) = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 B \left[\frac{A}{B} C_D(0) \left\{ 1 + \frac{2u(t)}{U} \right\} \right]$$

$$M_b(t) = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 B \left[C_M(0) \left\{ 1 + \frac{2u(t)}{U} \right\} + \left\{ \frac{dC_M(0)}{d\alpha} + \frac{A}{B} C_D(0) \right\} \frac{w(t)}{U} \right]$$

여기서 H_i^* , F_i^* , A_i^* 는 각각 공기동력학 계수로서 풍동실험으로 얻어지는 값이고, $u(t)$, $w(t)$ 는 각각 수평 및 수직 방향의 변동풍속이다. 버페팅 해석은 위의 공기력을 시간에 따라 구해 구조계에 하중으로 작용시켜 구한다.

2.4 변위 응답

앞서 언급한 바와 같이 당 교량은 협폭 장대 사장교이기 때문에 바람에 의한 횡방향 변위의 평가와 제진이 내풍에 있어 중요한 문제로 대두된다. 시공단계중 가장 위험한 단계인 Stage3에서 내풍케이블이 있는 경우와 없는 경우의 캔틸레버 끝단의 수평 변위를 그림 2에 수록하였다. 변위 시간이력 그래프에서 볼 수 있는 바와 같이 내풍케이블을 설치할 경우 응답이 약 40% 정도로 감소한다.

그림 3과 표 3은 수직, 수평, 비틀 변위를 케이블의 유무에 따라 각 시공단계별 최대변위를 나타낸 것이다. 수직변위는 케이블을 설치함에 따라 약 62%까지 감소하는데 케이블의 각도를 20도와 45도로 한 두가지 경우에 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 수평변위는 케이블의 설치각도에 크게 영향을 받는다. 케이블을 20도로 설치한 경우에는 60%정도로 감소하는 데 비해 케이블을 45도로 설치하게 되면 응답이 32%까지 줄어든다. 따라서 시공성이나 경제성에 문제가 없다면 45도로 케이블을 설치하는 방안을 추천한다.

표 3에서 보면 완성계의 수직, 수평 변위가 각각 0.558m, 1.469m인 것으로 나타나 있다. 버페팅에 대한 거스트 계수를 1.9로 하여 정적 구조해석을 하면 수평방향 변위는 0.8m인 것으로 평가가 된다. 동적 응답이 정적 응답에 비해 더 크다는 점을 감안하면 버페팅 해석의 수평 변위 1.469m는 납득할 만한 값인 것으로 판단된다.

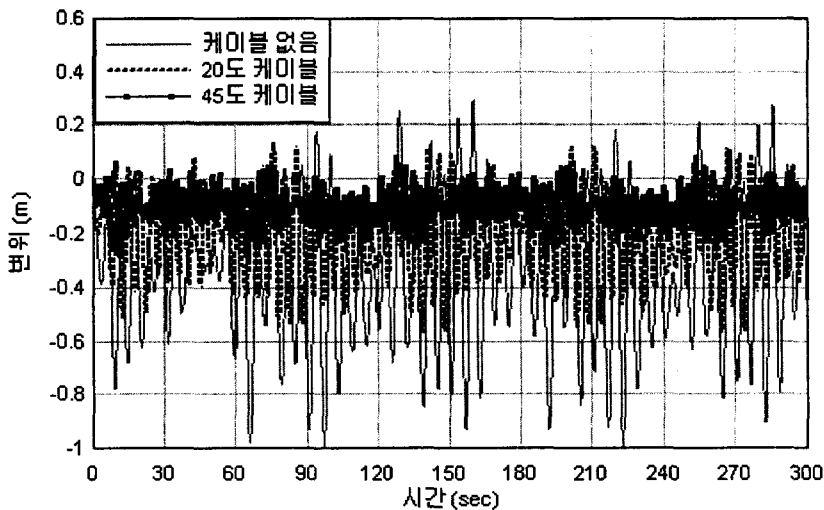


그림 2. Stage 3에서의 주경간 중앙지점의 수평변위

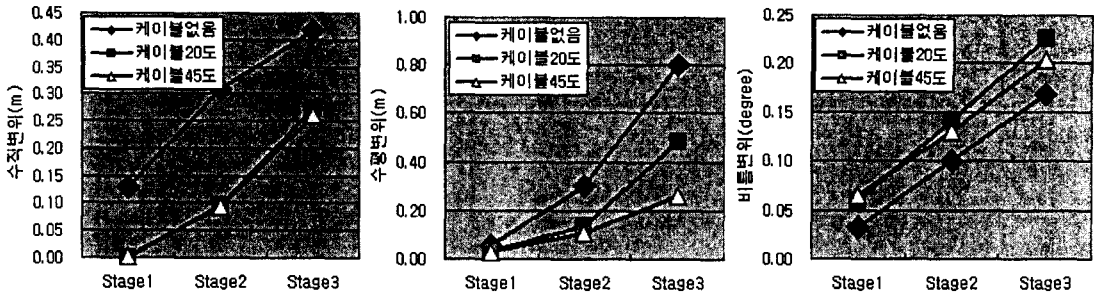


그림 3. 최대변위(평균+1.7RMS)

표 3. 시공단계별 최대변위(평균+1.7*RMS)

| 시공단계 | 케이블 | 최대변위(m, degree) | | |
|--------|---------|-----------------|--------|-------|
| | | 연직(수직) | 교직(수평) | 비틀 |
| 완성계 | 케이블 없음 | 0.558 | 1.469 | 0.408 |
| Stage1 | 케이블 없음 | 0.128 | 0.309 | 0.418 |
| | 20도 케이블 | 0.001 | 0.095 | 0.272 |
| | 45도 케이블 | 0.002 | 0.094 | 0.259 |
| Stage2 | 케이블 없음 | 0.056 | 0.300 | 0.802 |
| | 20도 케이블 | 0.032 | 0.135 | 0.484 |
| | 45도 케이블 | 0.028 | 0.107 | 0.259 |
| Stage3 | 케이블 없음 | 0.032 | 0.100 | 0.168 |
| | 20도 케이블 | 0.059 | 0.141 | 0.226 |
| | 45도 케이블 | 0.065 | 0.129 | 0.204 |

3. 결론

돌산~화태간 연도교의 완성계 및 시공단계별 버페팅 해석을 PCCAP을 이용하여 수행하였다. 시공단계는 구조계가 급격히 변화하는 7번째 케이블 설치후, 측경간 폐합직전, 중앙경간 폐합직전에 대해 각각 해석을 수행하였다.

돌산화태 연도교 단면의 유선형 박스거더 형태로서 풍동실험결과 내풍성이 매우 우수한 것으로 나타났다. 버페팅 해석에서도 동일한 결과가 나타나는데 중앙경간 폐합직전의 진동변위(가설단계 풍속 적용)는 폐합후 완성계의 진동변위(설계 기준풍속 적용)보다 작게 나타나기 때문에 가설중 버페팅에 의해 구조물의 안전을 위협받지는 않는다. 그러나 바람의 비선형성 및 난류가 대단히 불규칙하다는 점을 감안하여 보조적인 수단으로써 내풍케이블을 설치하여 가설중 내풍 안정성을 훨씬 증대시킬 수 있다.

내풍 안전케이블은 각 stage별 최대변위를 검토해 본 결과 45도로 설치하는 것이 20도로 설치하는 것보다 수평변위 억제 측면에서 우수하다. Stage 3에서 수평 변위는 45도 각도로 설치된 내풍케이블이 있을 경우 없는 경우에 비해 32%정도만 발생한다. 비틀 변위는 발생하는 변위의 절대적인 크기 자체가 작은 관계로 논의의 대상이다. 수직변위는 20도 내풍케이블을 설치한 경우와 45도 내풍케이블을 설치한 경우의 차이가 미소했다.

국내에서도 해상 장대교가 지속적으로 건설될 것이며 이에 따라 교량의 내풍 안정성 문제가 계속 대두될 것이다. 폭이 좁고 경간이 긴 교량을 건설할 때에는 횡방향 버페팅의 영향을 올바르게 평가하는 것이 교량의 안전에

직결되는 매우 중요한 사항이다. 풍동실험은 다수의 가설단계를 정확히 모형화하기에는 비용이 너무 고가이며 사장재 및 내풍 케이블을 모형화하기가 어려우므로, 2차원 단면 실험을 통해 공기력과 플로터 계수들을 구하고 이를 바탕으로 보다 정확하고 신뢰성 있는 버페팅 해석을 하는 것이 요구된다.

참고문헌

1. 삼성건설 건설기술연구소(1995), "프리스트레스 콘크리트 사장교의 해석시스템 개발"
2. 삼성물산 건설기술연구소(2003), "합성형 사장교의 시공단계해석 및 형상관리 시스템 PCCAP II 개발 최종 보고서"
3. TE 컨설턴트(2003), "돌산화태 연도교 내풍 안정성 평가 및 내풍성능 향상을 위한 풍동실험 및 CFD 보고서"
4. 삼성물산 건설기술연구소(2003), "돌산화태 연도교 버페팅 해석 보고서"