

차량 이동하중 해석에 의한 강합성 사장교 케이블의 충격계수 평가

Evaluation of Cable Impact Factor by Moving Vehicle Load Analysis in Steel Composite Cable-Stayed Bridges

박 용 명¹⁾ · 박 재 봉^{2)†} · 김 동 현³⁾ · 최 병 호⁴⁾

Park, Yong Myung · Park, Jae Bong · Kim, Dong Hyun · Choi, Byung Ho

요약 : 사장교의 케이블은 타 부재에 비해 단면적이 매우 작고 고응력 상태이므로 진동에 매우 민감한 부재이다. 따라서 사장교 케이블의 충격계수는 실제 차량의 주행으로 발생하는 동적 효과를 반영하여 평가하는 것이 합리적이다. 이에 본 연구에서는 차량 중량, 케이블 모델, 노면조도, 차량속도 및 차량간격의 설계변수를 고려하여 중앙경간 230m 및 540m의 강합성 사장교를 대상으로 차량 이동하중 해석을 수행하여 케이블의 충격계수를 평가하고, 현재 실무에서 사용되고 있는 영향선을 이용한 방법과 비교하였다. 본 연구에 사용된 노면조도는 ISO 8608 규정에 근거하여 랜덤 생성하였으며, 생성 회수에 따른 케이블 충격계수의 수렴 추이를 분석함으로써 결과의 신뢰도를 확보하였다. 또한, 차량모델은 9-자유도를 갖는 트랙터-트레일러 형식의 트럭 모델을 적용하였으며 차량의 운동방정식은 Lagrange 운동방정식으로부터 유도하였다. 해석 대상 교량은 3차원 유한요소모델로 구축하였으며 보강형과 주탑은 보요소, 케이블은 등가탄성계수를 갖는 트러스요소를 사용하였다. 이동하중으로 인한 교량-차량 상호작용 해석에는 직접적분법을 사용하였으며, 교량의 변위 오차율이 허용 범위 내에 수렴될 때까지 반복 해석을 수행하였다. 그 결과, 실제 차량의 주행으로 발생하는 동적 효과를 고려하지 못하는 영향선 기법은 차량 이동하중 해석에 비해 측경간 단부 케이블의 충격계수를 과소평가할 수 있는 것으로 나타났다.

ABSTRACT : The cables in cable-stayed bridges are under high stress and are very sensitive to vibration due to their small section areas compared with other members. Therefore, it is reasonable to evaluate the cable impact factor by taking into account the dynamic effect due to moving-vehicle motion. In this study, the cable impact factors were evaluated via moving-vehicle-load analysis, considering the design parameters, i.e., vehicle weight, cable model, road surface roughness, vehicle speed, longitudinal distance between vehicles. For this purpose, two steel composite cable-stayed bridges with 230- and 540-m main spans were selected. The results of the analysis were then compared with those of the influence line method that is currently being used in design practice. The road surface roughness was randomly generated based on ISO 8608, and the convergence of impact factors according to the number of generated road surfaces was evaluated to improve the reliability of the results. A 9-d.o.f. tractor-trailer vehicle was used, and the vehicle motion was derived from Lagrange's equation. 3D finite element models for the selected cable-stayed bridges were constructed with truss elements having equivalent moduli for the cables, and with beam elements for the girders and the pylons. The direct integration method was used for the analysis of the bridge-vehicle interaction, and the analysis was conducted iteratively until the displacement error rate of the bridge was within the specified tolerance. It was acknowledged that the influence line method, which cannot consider the dynamic effect due to moving-vehicle motion, could underestimate the impact factors of the end-cables at the side spans, unlike moving-vehicle-load analysis.

핵심용어 : 강합성 사장교, 케이블 충격계수, 교량-차량 상호작용 해석, 노면조도, 영향선 기법

KEYWORDS : steel composite cable-stayed bridges, cable impact factor, bridge-vehicle interaction analysis, road surface roughness, influence line method

1. 서론

케이블 재료의 고강도화 추세는 교량의 장경간화를 가능하게 하고 구조부재의 단면을 줄일 수 있어 경제적 측면에서도

유리한 장점이 있다. 그러나 사장교의 케이블은 타 부재에 비해 단면적이 매우 작고 고응력 상태이므로 교량이 장경간화됨에 따라 차량 주행 등의 요인에 의한 충격이 더욱 증가하게 된다. 따라서 실제 차량의 주행으로 인하여 발생하는 사장

1) 부산대학교 사회환경시스템공학부, 교수(ympk@pusan.ac.kr)

2) 교신저자, 부산대학교 사회환경시스템공학부, 박사과정

(Tel: 051-510-1460, Fax: 051-513-9596, E-mail: structure96@pusan.ac.kr)

3) 부산대학교 사회환경시스템공학부, 석사과정(kimdh7@pusan.ac.kr)

4) 국립한밭대학교 토목환경도시공학부, 조교수(bhchoi@hanbat.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2011년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

교의 동적 거동 평가를 통한 케이블 충격계수의 도출은 장기간 사장교의 건전성 확보 측면에서 중요한 문제라 판단된다.

현재 사장교의 충격계수를 산정하는 확립된 평가 방법이 없는 실정이며, 실무에서는 사장교 케이블의 충격계수를 산정하기 위해 케이블에 대한 영향선을 작도하여 설계부재에 최대 인장응력 또는 최대압축응력이 일어나도록 활하중이 재하된 시간부분의 길이를 각각 산출하고, 그 중 짧은 시간을 도로교 설계기준(대한토목학회, 2008)의 충격계수 산출식에 적용하여 케이블 충격계수를 산출하고 있다. 이 과정에는 설계부재에 최대압축응력이 일어나도록 활하중을 재하하는 경우가 발생하고, 이때 케이블에는 최대압축응력이 발생하는 것이 아니라 초기평형상태해석에 의한 인장응력이 일부 줄어드는 것으로서 케이블에 최대응력이 발생하지 않는 경우의 충격계수를 산출하는 문제점이 있다. 또한, 영향선 기법(influence line method)은 케이블 충격에 영향을 미치는 노면조도(road surface roughness) 및 교량과 차량의 동특성과 같은 주요 설계변수를 고려하지 못하는 문제점도 있는 실정이다.

실제 차량의 주행으로 인한 사장교의 동적 거동을 평가하기 위한 연구는 근래에 활발히 진행되어 왔다(Wang 등, 1992; Guo 등, 2001; Calçada 등, 2005). Wang 등(1992)은 교량-차량 상호작용 해석시 차량의 운동 방정식은 Runge-Kutta 법으로, 교량의 거동은 선형으로 간주하여 모드중첩법으로 시간 이력해석을 하는 방법을 제시하였으며, AASHTO standard specifications(1989)의 HS20-44 트럭을 차량모델로서 사용하였다. Guo 등(2001)은 교량 및 차량의 운동방정식을 결합된 형식(coupled sets of equations)으로 구성하여 직접적분법으로 해석하였으며, 한 개의 트랙터와 두 개의 트레일러를 갖는 총중량 682.53 kN의 차량모델을 사용하였다. 특히, Calçada 등(2005)은 중앙경간 246m의 실제 건설된 사장교를 대상으로 차량의 주행으로 인한 동적 거동을 실측하여 차량 이동하중 해석의 결과와 비교 검증하였다.

한편, 국내에서도 차량 이동하중에 의한 교량의 동적거동을 연구한 사례가 있다(황의승, 1991; 박영석 등, 1996; 장승필 등, 1990). 황의승(1991)과 박영석 등(1996)은 강합성 거더교를 대상으로 교량-차량 상호작용해석을 수행하여 교량의 동적거동을 분석하였다. 또한, 장승필 등(1990)은 사장교를 대상으로 주행차량에 의한 동적 거동을 파악하기 위해 Harp형 사장교 모델을 제작하여 실험을 수행하였는데 노면조도에 의한 충격의 효과는 고려하지 않았다.

본 연구에서는 ISO 8608(1995)의 규정을 적용하여 수차례 랜덤 생성된 노면형상을 고려한 케이블 충격계수의 수렴 추이를 분석함으로써 결과의 신뢰도를 확보하였다. 이후, 중앙경간 230m의 삼천포대교(이하 200m급)와 중앙경간 540m의 북항대교(이하 500m급)를 대상으로 영향선 기법으로는 고려

할 수 없는 주요 설계변수(차량 중량, 케이블 모델, 노면조도, 차량속도, 차량간격)를 고려하여 차량 이동하중 해석에 의한 사장교 케이블의 충격계수를 평가하고 영향선 기법 결과와 비교 분석하였다.

2. 차량 이동하중 해석 방법

2.1 노면조도

일반적으로 도로의 노면은 시공중 오차나 사용중 변형으로 인하여 평탄하지 않고 연직방향으로 고저차가 발생하는데, 이를 노면조도라 하며 교량-차량의 동적 거동에 영향을 미치는 주요 인자로 알려져 있다(Wang 등, 1992). 노면조도는 평균값이 영인 정상확률과정(stationary Gaussian random process)으로 가정한 지수스펙트럴밀도(power spectral density, PSD) 함수로 구현하는 방법이 일반적으로 사용되고 있다(Dodds 등, 1973). 본 연구에서는 ISO 8608(1995)의 규정을 적용하였는데, ISO에서는 노면의 연직방향 형상을 식 (1)의 PSD 함수 G_d 로 제시하고 있다.

$$G_d(\Omega) = G_d(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-w} \tag{1}$$

- 여기서, Ω : angular spatial frequency(rad/m)
- Ω_0 : reference angular spatial frequency(1rad/m)
- $G_d(\Omega_0)$: spectral roughness coefficient
- w : spectral roughness exponent(=2.0)

한편, ISO 8608에서는 노면조도를 표 1과 같이 5개의 등급으로 구분하고 있으며, 일반적으로 노면의 임의 형상(random profile)은 식 (2)와 같이 sin 함수의 중첩에 의해 근사화(sinusoidal approximation)될 수 있다.

표 1. 노면등급

Road Class	Pavement Quality	$G_d(\Omega_0)[10^{-6}m]$
		Geometric mean
A	Very good	1
B	Good	4
C	Medium	16
D	Poor	64
E	Very Poor	256

$$z(s) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(\Omega_i s - \Psi_i) \tag{2}$$

- 여기서, s : distance along the road(m)
- Ψ_i : random phase angle uniformly distributed from 0 to 2π

식 (2)에서 진폭 A_i 는 $z(s)$ 의 분산(variance)으로부터 구해지며, 최종적으로 노면조도는 식 (3)으로 표현된다(Guo 등, 2001).

$$z(s) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2G_d(\Omega_i)\Delta\Omega} \sin(\Omega_i s - \Psi_i) \quad (3)$$

여기서, N : number of division in angular frequency
 $\Delta\Omega : (\Omega_N - \Omega_1)/N$

본 연구에서는 장대교량의 경우 노면관리가 잘 되는 것으로 간주하여 ISO 8608의 Road Class A, B, C의 조건만을 고려하였다. 식 (3)을 이용하여 대상 교량의 총연장 구간에 대해 0.1m 간격으로 노면조도 성분을 랜덤 생성하였으며, 생성된 노면형상의 일례를 100m 구간에 대해서만 보이면 그림 1과 같다. 또한, 조도성분의 빈도수를 그림 2에 보였는데 노면형상이 정규 분포(normal distribution)를 따르는 것을 확인할 수 있다.

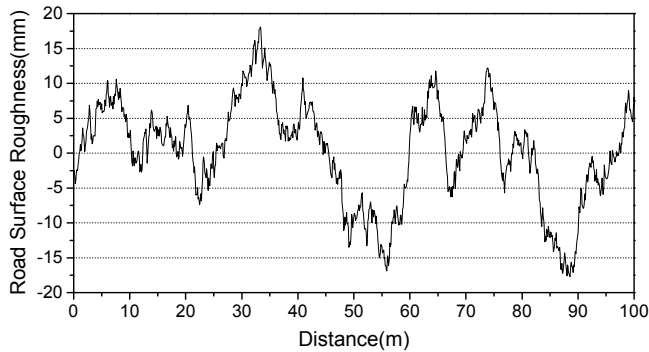


그림 1. 생성된 노면형상의 일례(Road Class B)

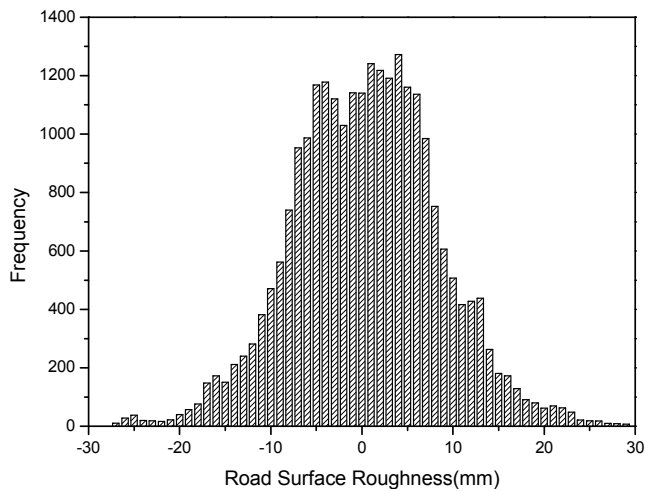


그림 2. 노면형상의 통계적 특성 일례(Road Class B)

2.2 차량모델

본 연구에서 고려한 차량모델은 그림 3에 제시한 트랙터-트레

일러 형식(EUROCODE 1, 2001; Calçada 등, 2005)의 트럭이다. 본 모델은 총중량이 396.12 kN으로서 국내 DB-24 하중에 근접한 총중량을 보이며, 차축 간격도 비교적 유사하여 본 연구에서 적용하였다. 또한, 본 차량모델의 운동방정식 구성을 위한 현가장치 등의 물성치는 표 2에 제시하였다.

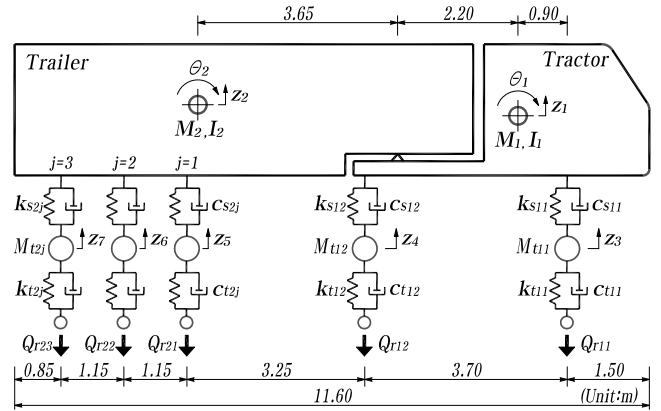


그림 3. 차량 모델

표 2. 차량모델의 물성치

구분	Tractor		Trailer		
i	1		2		
j	1	2	1	2	3
M_i ($10^3 kg$)	4.50		31.48		
I_i ($10^3 kg \cdot m^2$)	4.60		128.54		
M_{tij} ($10^3 kg$)	0.80	1.20	0.80(each)		
k_{sij} (kN/m)	430.0	1,470.0	1,470.0(each)		
c_{sij} ($kN \cdot s/m$)	9.34	21.49	21.22(each)		
k_{tij} (kN/m)	2,142.0	4,724.0	4,724.0(each)		
c_{tij} ($kN \cdot s/m$)	3.56	4.20	6.15(each)		
Q_{rij} (kN)	54.74	92.41	82.99(each)		

차체(car body)의 운동은 연직운동(bouncing)과 전후방향 회전운동(pitching)을 고려하고, 차축(axle)은 연직운동만을 고려하는 것으로 하여 9-d.o.f. 차량모델로 고려하였다. 차량의 운동방정식은 식 (4)의 Lagrange 운동방정식으로부터 식 (5) 형태의 차량 운동방정식을 유도하였다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial q_i} \right) + \left(\frac{\partial V}{\partial q_i} \right) + \left(\frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} \right) = 0 \quad (4)$$

여기서,

T : 차량시스템의 운동에너지, V : 차량시스템의 위치에너지,

D : 차량시스템의 소산에너지(dissipation energy)이고,

q_i 와 \dot{q}_i 는 변위 및 속도 성분이다.

$$[m_v] \{\ddot{q}_v\} + [c_v] \{\dot{q}_v\} + [k_v] \{q_v\} = \{F_v\} \quad (5)$$

여기서, $[m_v]$, $[c_v]$, $[k_v]$, $\{\ddot{q}_v\}$, $\{\dot{q}_v\}$, $\{q_v\}$ 는 각각 차량의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬, 가속도벡터, 속도벡터, 변위벡터이고, $\{F_v\}$ 는 $k_t \Delta z_t + c_t \dot{\Delta z}_t$ 의 하중벡터이다. 여기서, k_t 와 c_t 는 타이어의 강성 및 감쇠이며 Δz_t 와 $\dot{\Delta z}_t$ 는 시간증분 동안의 타이어 중심과 접촉면의 변위차 및 속도차이며, 노면조도와 교량의 동적변위가 포함된다.

한편, 본 연구에서는 차량의 동적 거동 해석시 다음의 가정을 적용하였다.

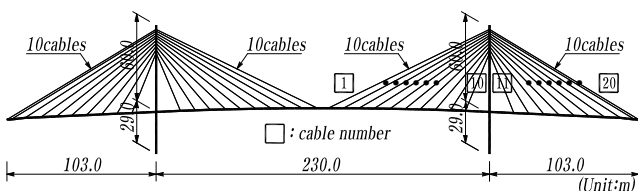
- ① 차체, 차축 및 타이어 등 모든 질량체는 강체이다.
- ② 현가장치 및 감쇠는 선형으로 가정한다.
- ③ 타이어는 도로와 접촉된 상태를 유지한다.
- ④ 차량은 일정한 속도로 이동한다.

2.3 교량모델

본 연구에서 고려한 교량은 중앙경간 200m급 및 500m급 강 합성 사장교로서 그림 4에 개략적 제원을 제시하였으며, 차량 이동하중 해석을 위하여 대상 교량을 그림 5와 같이 3차원 유한 요소모델로 구성하였다. 교량의 초기평형상태해석을 수행하여 각 케이블의 초기장력값을 산출하였으며, 산출된 초기장력값에 근거하여 Ernst(1965)에 의한 등가탄성계수를 각 케이블에 적용하였다. 또한, 그림 5의 3차원 유한요소모델에서 케이블은 축방향 및 횡방향 강성을 고려한 절점당 3개의 자유도를 가지는 비선형 트러스요소, 보강형과 주탑은 보요소, 교량 받침은 링크요소, 경계조건은 스프링요소를 사용한 것이다. 한편, 교량-차량 상호작용 해석을 위한 교량의 운동방정식은 식 (6)과 같다.

$$[m_b] \{\ddot{x}_b\} + [c_b] \{\dot{x}_b\} + [k_b] \{x_b\} = \{F_b\} \quad (6)$$

여기서, $[m_b]$, $[c_b]$, $[k_b]$, $\{\ddot{x}_b\}$, $\{\dot{x}_b\}$, $\{x_b\}$ 는 각각 교량의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬, 가속도벡터, 속도벡터, 변위벡터이고, $\{F_b\}$ 는 차량 바퀴의 동적 접촉력에 의한 동적하중 벡터이다.



(a) 200m급 사장교

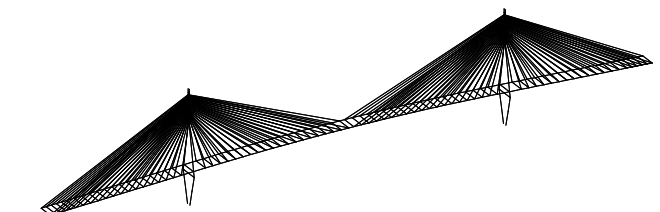


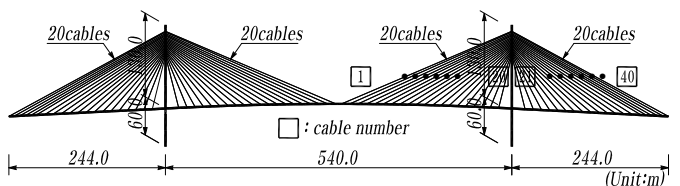
그림 5. 3-D 유한요소모델(500m급 모델)

2.4 교량-차량 상호작용 해석 방법

본 연구에서는 교량-차량 상호작용 해석시 교량과 차량의 운동 방정식을 독립된 형식(uncoupled sets of equations)으로 구성하고, 교량-차량 접촉면에서의 적합조건식(compatibility conditions)을 고려하여 교량의 변위 오차율이 허용 범위 이내 가 될 때까지 해석을 반복하였다(Yang 등, 1996). 이때, 적합 조건식에는 현 시간단계에서의 노면조도와 교량 및 차량의 변위가 고려된다. 교량-차량 상호작용 해석의 순서는 먼저, 현 시간 단계에서의 차량의 위치와 차축 아래의 노면조도를 계산해 두고, 현 해석단계의 교량 변위를 가정한다. 다음으로, 계산된 노면조도와 가정한 교량 변위를 이용하여 차량의 운동방정식을 해석하면 차량이 교량에 미치는 접촉력이 계산되고, 그 접촉력을 이용하여 교량의 운동방정식을 풀어 새로운 교량 변위를 산출한다. 최종적으로, 식 (7)의 norm 형태의 교량 변위 오차율 ϵ_b 가 1.0×10^{-10} 보다 작아질 때까지 해석을 반복 수행하여 수렴된 교량의 변위를 산출함으로써 현 시간단계에서의 상호작용 해석을 완료하게 된다. 교량-차량 상호작용 해석의 개략적 흐름도(Flowchart)를 그림 6에 나타내었다.

$$\epsilon_b = \frac{\sum_{k=1}^n \{(x_b^{(i)} - x_b^{(i-1)})_{(k)}\}^2}{\sum_{k=1}^n \{(x_b^{(1)} - x_b^{(0)})_{(k)}\}^2} \quad (7)$$

- 여기서, $x_b^{(0)}$: 교량 변위의 초기 가정치
- $x_b^{(1)}$: 첫번째 반복 단계에서 구해진 교량변위
- $x_b^{(i-1)}$: (i-1)번째 반복 단계에서의 교량변위
- $x_b^{(i)}$: (i)번째 반복 단계에서 새로 구한 교량변위
- n : 변위의 자유도수



(b) 500m급 사장교

그림 4. 해석대상교량 개략 제원

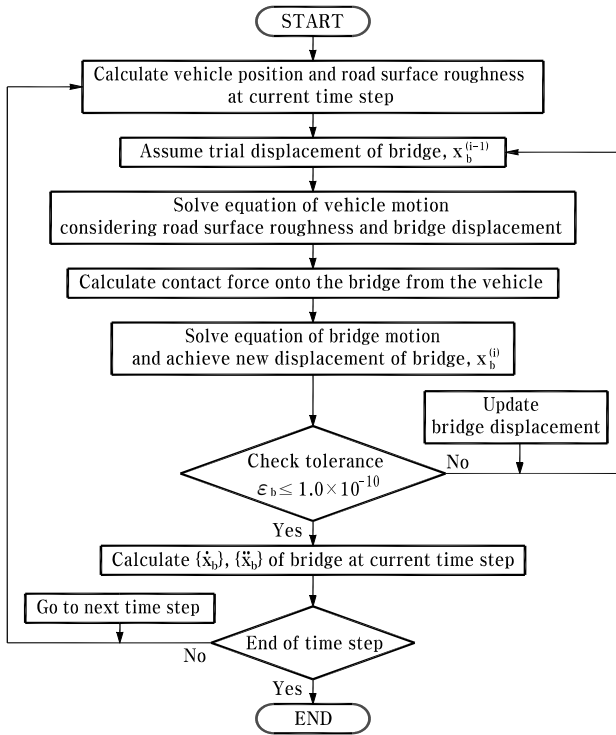


그림 6. 교량-차량 상호작용해석의 흐름도

3. 케이블 충격계수 평가 방법

3.1 영향선 기법에 의한 케이블 충격계수

현재 실무에서는 사장교 케이블의 충격계수를 산출하기 위해 그림 7에 보인 200m급 사장교의 중점부 케이블 예와 같이 케이블 장력에 대한 영향선을 작도하여 케이블에 최대인장응력 또는 최대압축응력이 발생하도록 활하중이 재하된 시간부분의 길이 $L_{tension}$ 및 $L_{compression}$ 를 각각 산출하고 그 중 짧은 시간을 국내 도로교설계기준(대한토목학회, 2008)에서 제시하는 식 (8)에 적용하여 케이블 충격계수를 산출하고 있다. 본 논문에서는 실무에서 사용하고 있는 이러한 방법을 영향선 기법(Influence Line Method)이라 정의하였다.

$$I = \frac{15}{40 + L} \leq 0.3 \quad (8)$$

여기서, L 은 원칙적으로 활하중이 등분포하중인 경우에 설계부재에 최대응력이 일어나도록 활하중이 재하된 시간부분의 길이(m)이다.

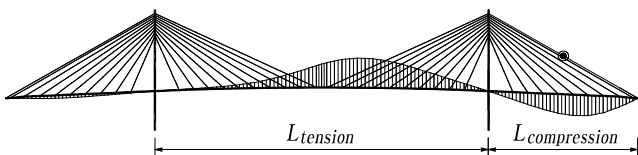


그림 7. 케이블 장력에 대한 영향선의 일례(200m급, Cable #20)

3.2 차량 이동하중 해석에 의한 케이블 충격계수

차량 이동하중 해석을 수행하여 그림 8과 같은 케이블 장력 증분에 대한 시간이력곡선을 도출하였으며, 정적 대비 동적 해석시의 최대 장력 증분값을 기준으로 하여 차량 이동하중 해석에 의한 케이블 충격계수(Impact Factor)를 식 (9)와 같이 정의하였다.

$$I.F. = \frac{Max(\Delta f_{dynamic})}{Max(\Delta f_{static})} - 1 (\%) \quad (9)$$

여기서, $Max(\Delta f_{dynamic})$ 은 동적 하중에 의한 케이블 장력의 최대 증분이고, $Max(\Delta f_{static})$ 은 정적 하중에 의한 케이블 장력의 최대 증분이다.

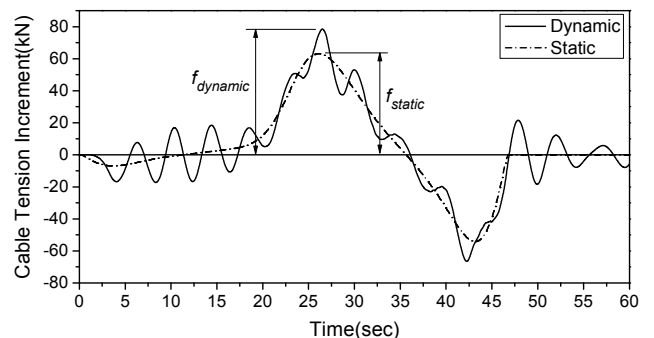


그림 8. 케이블 장력 증분 이력곡선의 예

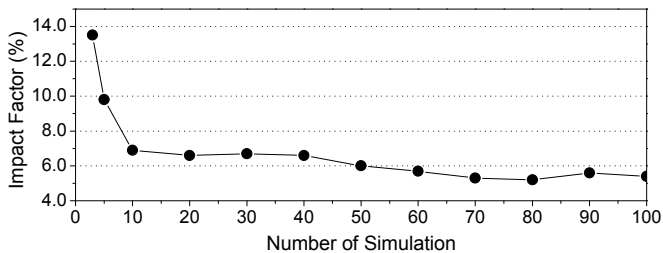
3.3 케이블 충격계수 산출과정

본 연구에서 고려된 노면조도는 랜덤 과정(random process)에 의한 것이므로 케이블 충격계수는 통계학적 방법을 도입하여 평가하였다. 먼저, ISO 8608의 규정을 적용하여 노면형상 100set를 랜덤 생성하고 차량 이동하중 해석을 수행하여 각 케이블의 충격계수 100개씩을 산출하였다. 이후, 산출된 100개의 결과를 표본으로 하여 신뢰도 수준 95%의 케이블 충격계수 $i_{95\%}$ 를 식 (10)으로부터 산출하였다. 식 (10)에 의한 $i_{95\%}$ 는 통계학적으로 임의의 모집단 평균에 대해 95%의 신뢰도를 가지므로 랜덤 과정에 의해 생성된 노면 조도를 적용한 케이블 충격계수로서 적정하다고 판단된다.

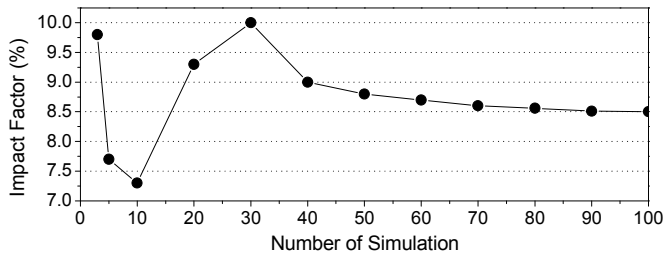
$$i_{95\%} = m + 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (10)$$

여기서, N , σ , m 은 각각 노면조도 생성회수, 표준편차, 평균이다.

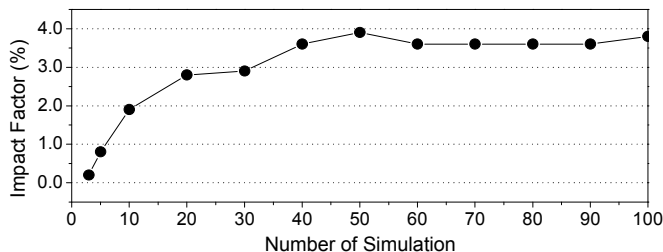
한편, 노면조도 랜덤생성회수의 적정치를 산정하기 위해 노면조도 생성회수에 따른 케이블 충격계수 $i_{95\%}$ 의 수렴 추이를 분석하였으며, 그 결과 대표적 수렴 형태는 그림 9와 같이 나타났다. 그림 9에서 보는 바와 같이 케이블 충격계수 $i_{95\%}$ 는 노면조도 생성회수 50set 정도에서 수렴하는 것으로 나타났다. 따라서 이후 설계변수 해석에서 평가된 케이블 충격계수는 노면등급별(Road Class A, B, C) 각각 50set의 노면형상을 적용한 $i_{95\%}$ 값이다.



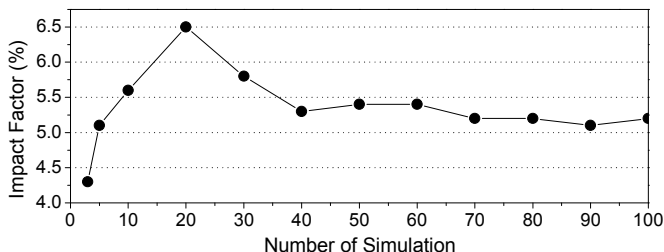
(a) 200m급(케이블#1)



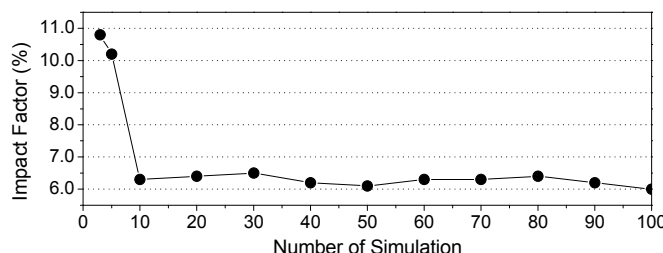
(g) 500m급(케이블#1)



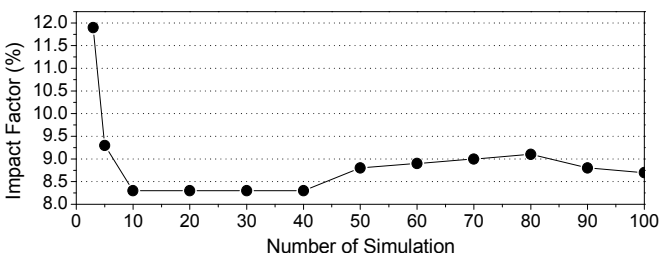
(b) 200m급(케이블#5)



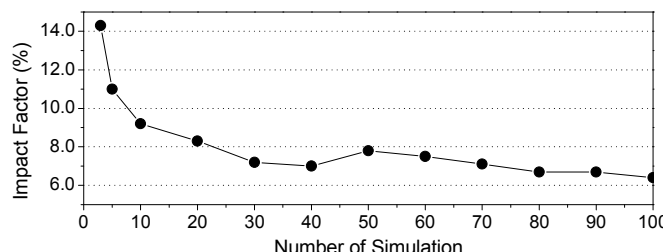
(h) 500m급(케이블#11)



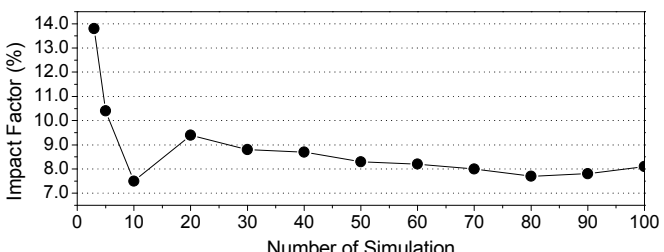
(c) 200m급(케이블#10)



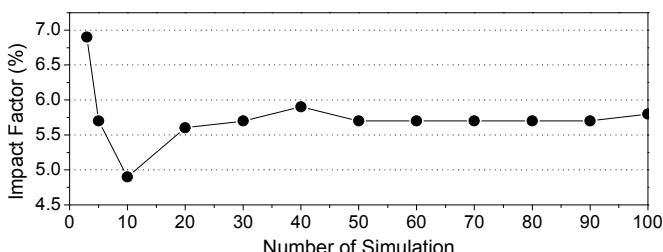
(i) 500m급(케이블#20)



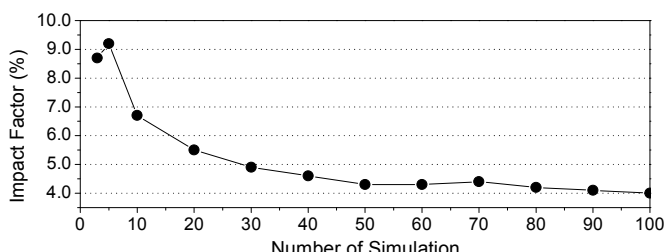
(d) 200m급(케이블#11)



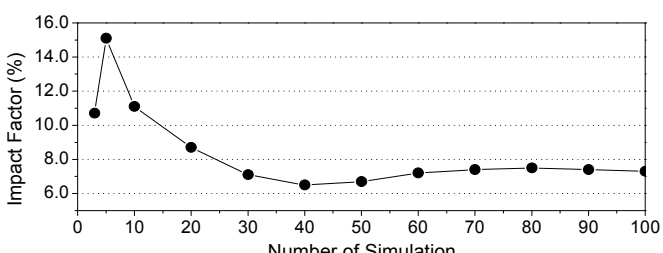
(j) 500m급(케이블#21)



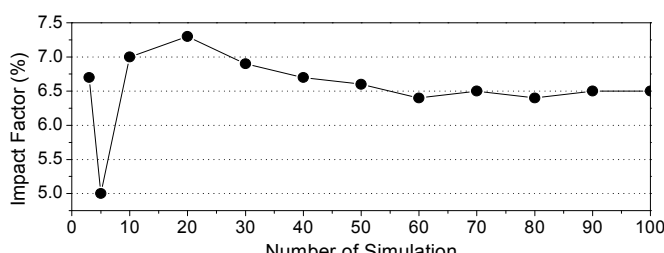
(e) 200m급(케이블#16)



(k) 500m급(케이블#30)



(f) 200m급(케이블#20)



(l) 500m급(케이블#40)

그림 9. 노면조도 생성회수에 따른 케이블 충격계수($i_{95\%}$)

4. 설계변수 해석

4.1 차량 중량의 영향

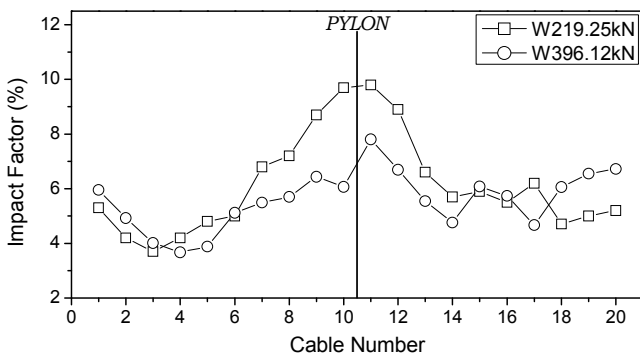
주행 차량의 중량이 케이블 충격계수에 미치는 영향을 평가하기 위해 그림 3에 제시하였던 총중량 396.12 kN의 차량 모델과 Mulcahy(1983)가 사용한 트랙터-트레일러 형식의 트럭을 고려하였는데 Mulcahy(1983)가 사용한 차량모델은 총중량이 219.25 kN으로서 국내 DB-13.5 하중에 근접한 총중량을 보이며 차량모델의 제원 및 물성치는 참고문헌 (Mulcahy, 1983)의 수치를 사용하였다. 차량 중량의 영향을 평가하기 위해 중량이 다른 다수의 차량이 고려될 필요성이 있으나, 본 연구에서는 차량 중량에 따른 상대적 비교를 위해 Mulcahy(1983)와 Calçada 등(2005)이 사용한 두 종류의 차량모델만을 고려하였다.

차량 이동하중 해석은 1대의 차량이 교량의 1차선으로 Road Class B의 노면 조건을 80km/h의 속도로 주행하는 경우를 고려하였다. 그 결과는 그림 10에서 보는 바와 같이 교량 중앙부 및 종점부에서는 총중량 396.12 kN의 경우가 총중량 219.25 kN의 경우에 비해 케이블 충격계수가 상회하고, 주탑 부근에서는 총중량 219.25 kN의 경우가 총중량 396.12 kN의 경우에 비해 충격계수가 상회하는 것으로 나타났다. 이는 차량 현가장치의 특성파도 연관이 있을 것으로 판단되며 실제 거동에 더욱 근접한 해석을 위해서는 현가장

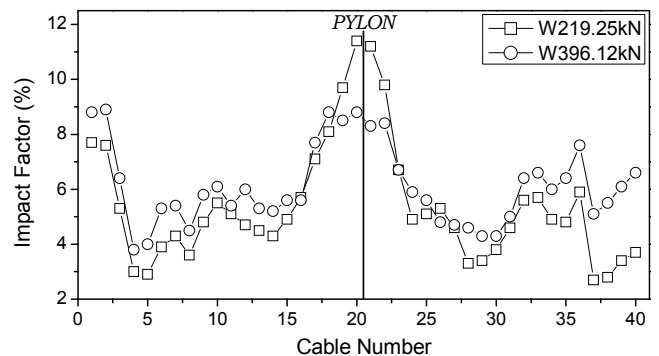
치의 비선형 거동을 고려하여야 하나, 비선형 현가장치가 제시된 차량모델의 수집이 불가능하여 본 연구에서는 현가장치를 선형으로 고려하였다. 이후 설계변수 해석에서는 국내 장대 교량이 1등교로 설계되는 점을 감안하여 총중량이 396.12 kN인 차량모델(Calçada 등, 2005)을 고려하였다.

4.2 차량 이동하중 횡방향 재하 위치

차량 이동하중의 횡방향 재하 위치를 결정하기 위해 표준 차로폭 3.6m를 감안하여 그림 11에 보인 1차선 및 2차선을 차로당 1대의 차량이 각각 주행하는 경우와 1, 2차선을 차로당 1대의 차량이 동시에 병렬 주행하는 경우를 고려하였다. 이때, 차량은 80km/h의 속도로 Road Class B의 노면 조건을 주행하는 경우이다. 그 결과는 그림 12에서 보는 바와 같이 1차선 및 2차선을 각각 주행하는 경우의 케이블 충격계수는 거의 차이를 보이지 않았으며 1, 2차선을 동시에 주행하는 경우에 비해 주탑 부근의 일부 케이블에서 충격계수가 조금 상회하는 것으로 나타났다. 한편, 1, 2차선을 동시에 주행하는 경우는 200m급의 종점부 케이블에서 1차선 및 2차선을 주행하는 경우에 비해 충격계수가 조금 상회하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 고려한 차량 횡방향 재하 위치에 대해 대다수 케이블의 충격계수는 거의 차이를 보이지 않는 것으로 나타나 이후 설계변수 해석에서는 차량 하중이 교량의 1차선에 재하된 경우를 고려하였다.

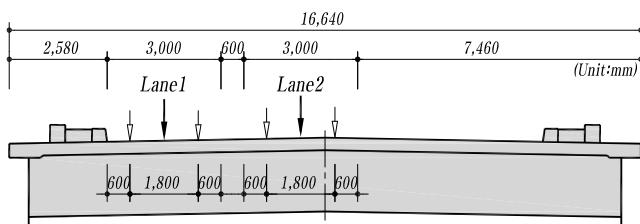


(a) 200m급

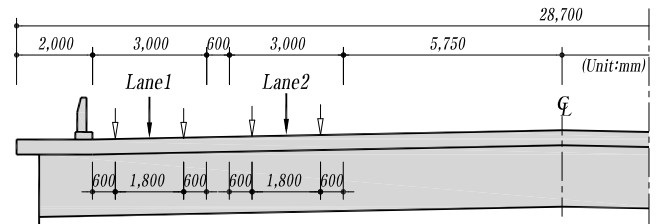


(b) 500m급

그림 10. 차량 중량별 케이블 충격계수(Road Class B)



(a) 200m급



(b) 500m급

그림 11. 차량 이동하중 횡방향 재하 위치

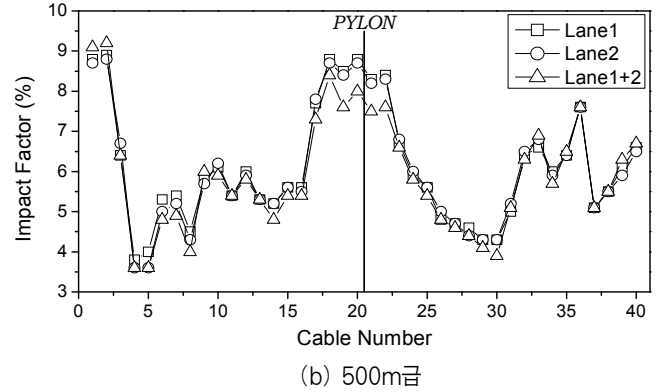
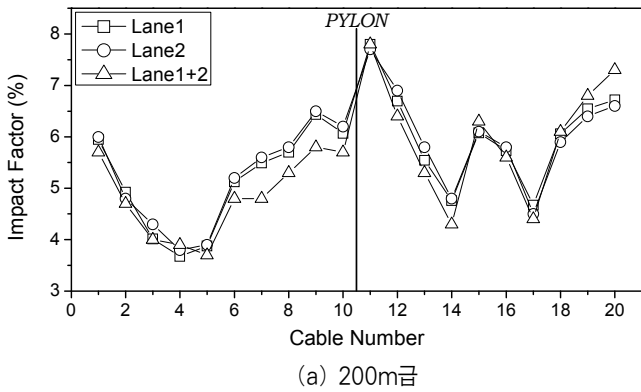


그림 12. 횡방향 재하 위치별 케이블 충격계수(Road Class B)

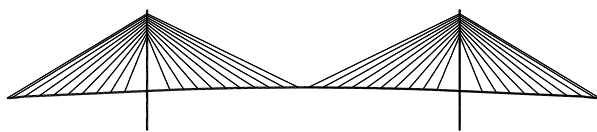
4.3 케이블 모델의 영향

케이블 자체 진동이 충격계수에 미치는 영향을 평가하기 위해 해석 대상 사장교의 케이블을 단일요소케이블(Single element cable, S.E.C.)과 다요소케이블(Multi elements cable, M.E.C.)로 모델링하였는데, M.E.C. 모델에 사용된 케이블은 S.E.C. 모델의 케이블을 8등분한 것으로 그림 13에 S.E.C. 및 M.E.C. 모델 형상을 제시하였다.

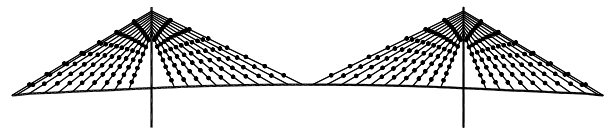
한편, 케이블 모델에 따른 대상 교량의 동적 거동 특성 평가를 위해 고유치해석을 수행하였으며, 대상 교량에서 지배적인 첫 번째 연직진동모드, 교축방향 수평진동모드 및 비틀림 모드 형태는 그림 14와 같고 이때, 각 경우별 고유주기는 표 3에 제시한 바와 같이 케이블 모델에 따른 고유주기의 차이는

미소한 것으로 나타났다.

또한, 본 연구에서 사용한 교량모델의 타당성을 검증하기 위해 상용 구조해석 프로그램인 Midas Civil 2006을 사용하여 고유치해석을 수행하였으며 실제 교량의 구조계산서(건설교통부 부산지방국토관리청, 1991; 북항아이브리지주식회사, 2007)와 비교하였다. 그 결과는 표 3에 나타난 바와 같이 본 연구에서 사용한 프로그램의 결과는 상용 구조해석 프로그램의 결과와 거의 일치하였으며, 실제 교량의 구조계산서와는 약간의 차이를 보이는데 이는 모델링 단계에서 실제 교량의 복잡한 구조를 개략화 하는 과정에서 발생한 미소한 오차라 판단된다. 따라서 본 연구에서 사용한 교량모델은 실제 교량의 동특성과도 거의 유사하여 해석대상 교량모델로서 타당성이 충분히 검증된 것으로 판단된다.

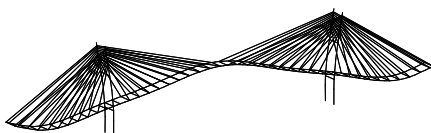


(a) S.E.C. 모델(200m급)

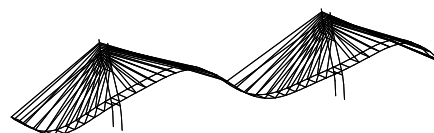


(b) M.E.C. 모델(200m급)

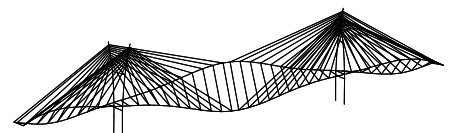
그림 13. 케이블 모델 형상



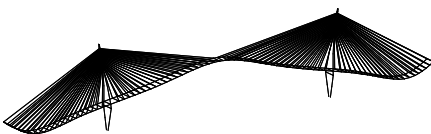
(a) 연직처짐 모드(200m급)



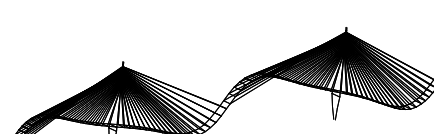
(b) 교축방향 수평처짐 모드(200m급)



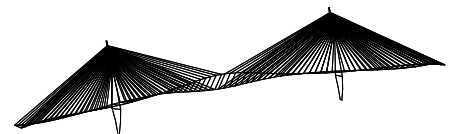
(c) 비틀림 모드(200m급)



(d) 연직처짐 모드(500m급)



(e) 교축방향 수평처짐 모드(500m급)



(f) 비틀림 모드(500m급)

그림 14. 진동 모드 형태

표 3. 동적 고유주기 (단위 : sec)

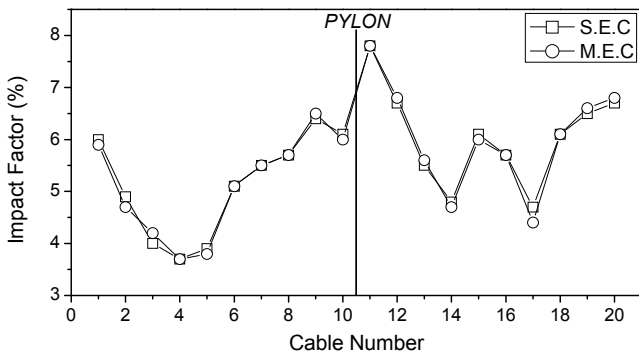
구 분	케이블 모델	수평처짐(교축)		비틀림 모드 주기
		연직처짐 모드 주기	수평처짐(교축) 모드 주기	
200m급	본연구 프로그램	S.E.C.	2.136	1.712
	상용프로그램	M.E.C.	2.122	1.699
	구조계산서	S.E.C.	2.006	1.637
	구조계산서	S.E.C.	2.433	1.768
500m급	본연구 프로그램	S.E.C.	4.529	3.769
	상용프로그램	M.E.C.	4.440	3.747
	구조계산서	S.E.C.	4.466	3.750
	구조계산서	S.E.C.	4.029	3.385

케이블 모델에 따른 설계변수 해석시 노면조도는 Road Class B를 적용한 것이며, 한 대의 차량이 80km/h의 속도로 교량의 1차선을 주행하는 경우를 고려하였다. 그 결과 케이블 충격계수는 그림 15에서 보는 바와 같이 S.E.C. 모델 및 M.E.C. 모델이 거의 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 따라서 케이블 자체 진동의 고려가 가능한 M.E.C. 모델의 결과로부터 케이블의 진동이 충격계수에 거의 영향을 주

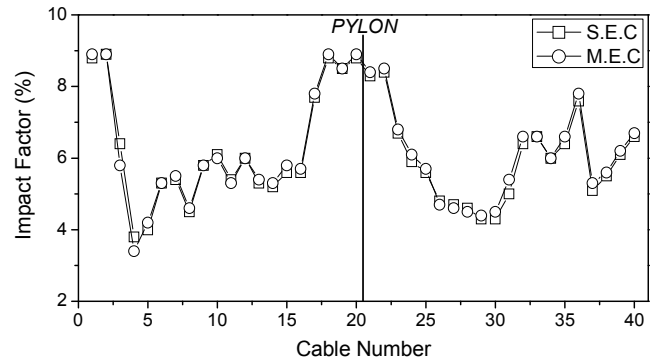
지 않는 것으로 나타났고, 이후 설계변수 해석시에는 S.E.C. 모델을 일괄적으로 적용하였다.

4.4 노면조도의 영향

장대교량의 경우 노면관리가 잘되는 것으로 간주하여 노면조도는 Road Class A, B, C의 조건만을 고려하였으며, 한 대의 차량이 80km/h의 속도로 교량의 1차선을 주행하는 경우를 고려하였다. 그 결과는 그림 16에서 보는 바와 같이 노면조도가 증가할수록 케이블 충격계수는 증가하였으며, 실무에서 사용되고 있는 영향선 기법은 200m급에 대해 Road Class C의 결과에 근접하였고, 500m급에 대해 Road Class B의 결과에 근접하는 것으로 나타나, 지간이 짧은 경우가 긴 경우에 비해 케이블 충격계수는 상대적으로 크게 나타났다. 또한, 영향선 기법은 노면조도의 등급이 Road Class C로 증가함에 따라 차량 이동하중 해석 결과에 비해 주탑 부근 및 시·종점 부 케이블의 충격계수를 과소평가하는 것으로 나타났다.

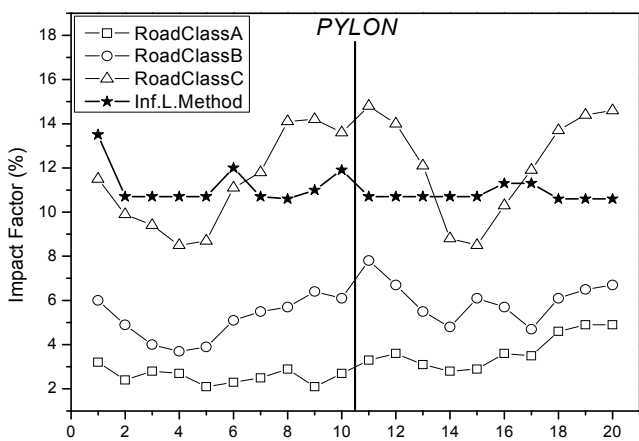


(a) 200m급

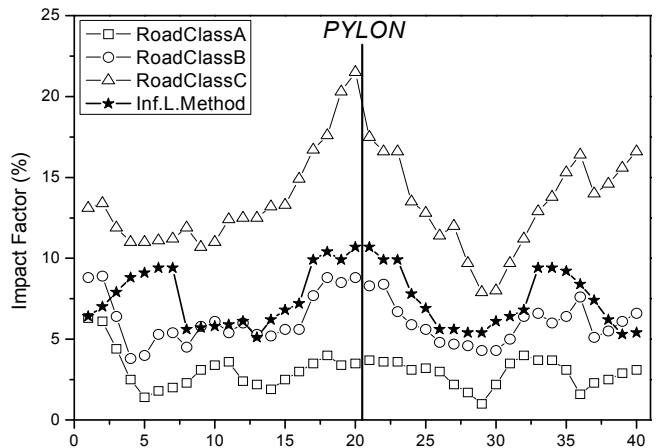


(b) 500m급

그림 15. 케이블 모델별 충격계수(Road Class B)



(a) 200m급



(b) 500m급

그림 16. 노면조도별 케이블 충격계수(80km/h)

4.5 차량 속도의 영향

차량의 속도는 국내 도로교통법에서 규정하고 있는 고속도로상의 중차량에 대한 최고속도가 90km/h인 점을 감안하여 60, 70, 80, 90km/h의 속도를 고려하였으며, 한 대의 차량이 교량 1차선으로 Road Class B의 조건을 주행하는 경우를 고려하였다. 그 결과는 그림 17에서 보는 바와 같이 고려된 차량속도 변수에 대해 속도가 증가할수록 200m급에서는 모든 위치의 케이블에서, 500m급에서는 주탑 부근의 케이블에서 충격계수가 비교적 일정하게 증가하였으며 특히, 500m급의 시·중점부 케이블은 차량속도 60, 70, 90km/h에서 영향선 기법 결과를 현저히 상회하는 것으로 나타났다.

4.6 차량 간격의 영향

차량 두 대가 Road Class B의 조건을 80km/h의 속도로

교량의 1차선을 주행하는 경우 앞 차량과의 차량간격이 케이블 충격계수에 미치는 영향을 평가하기 위하여 200m급 사장교에 대해 차량간격 100, 150, 190, 200, 210, 220, 230, 250, 300m의 변수를, 500m급에 대해 200, 300, 400, 450, 500, 510, 550, 600m의 변수를 고려하였다. 그 결과는 그림 18에서 보는 바와 같이, 200m급에 대해서는 차량간격 150m~220m 사이의 설계변수에서 동일한 조건의 차량 한 대가 주행하는 경우에 비해 충격계수가 크게 평가되는 케이블이 발생하였으며 특히, Cable #19, #20의 결과는 차량간격 190m~210m의 설계변수에서 영향선 기법 결과를 크게 상회하는 것으로 나타났다. 한편, 500m급에 대해서는 시·중점부 케이블에서 차량간격 200m~600m 사이의 설계변수에 대해 동일한 조건의 차량 한 대가 주행하는 경우에 비해 충격계수가 크게 평가되었으며, 500m 내외에서 매우 크게 나타났다. 또한, Cable #37, #38, #39, #40의 결과는 영향선 기법 결과를 현저히 상회하는 것으로 나타났다.

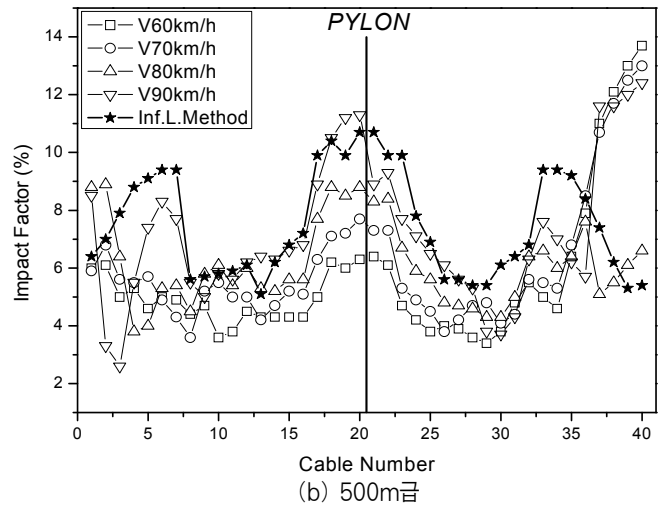
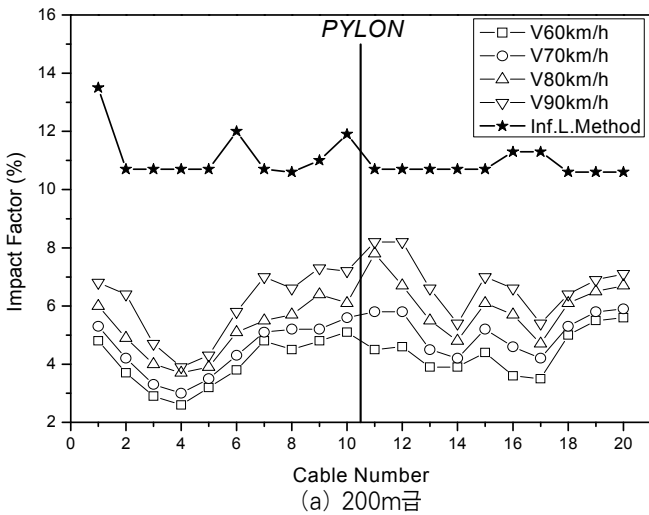


그림 17. 차량 속도별 케이블 충격계수(Road Class B)

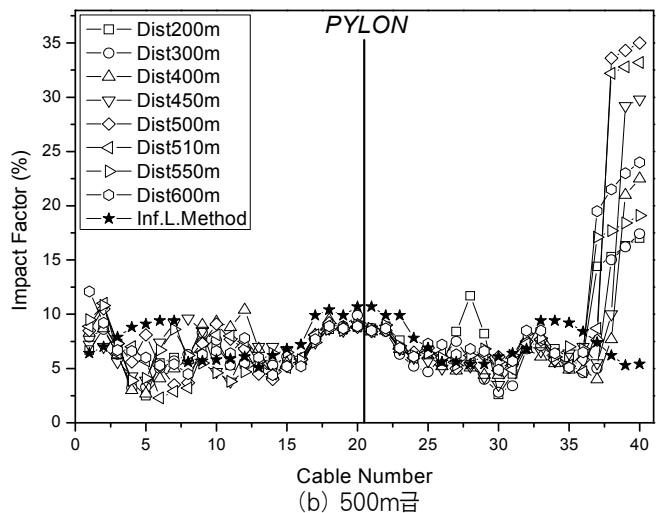
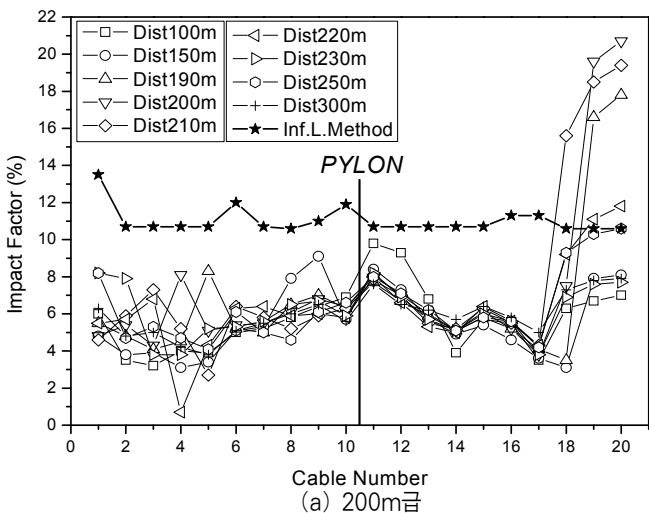


그림 18. 차량 간격별 케이블 충격계수(Road Class B, 80km/h)

그림 18의 시·종점부 케이블 충격계수가 크게 평가되는 원인을 분석하고자 그림 19에 충격계수가 가장 크게 평가되는 시간 단계에서의 차량 위치를 나타내었다. 그림 19(a), (b)는 그림 18(a)의 20번 케이블과 그림 18(b)의 40번 케이블의 경우를 각각 나타낸다. 즉, 첫 번째 차량이 교량을 벗어나기 직전 두 번째 차량이 교량의 중앙부 근처에 위치하는 시간단계로서, 이때 중앙부 케이블과 종점부 케이블이 일시적으로 평형을 이루다 첫 번째 차량이 교량을 벗어나는 순간 주탑이 교량의 중앙 측으로 기울면서 종점부 케이블의 충격이 증폭되는 것으로 분석되었다.

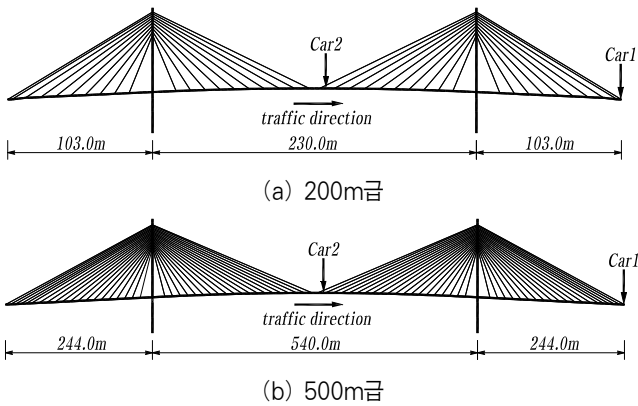


그림 19. 케이블 충격계수 증폭시 차량위치

5. 결론

본 연구에서는 실제 차량의 주행으로 인한 동적 효과를 고려하여 중앙경간 200m급 및 500m급 강합성 사장교를 대상으로 케이블의 충격계수를 평가하고 실무에서 사용되고 있는 영향선 기법 결과와 비교하였다. 차량 이동하중에 의한 사장교 케이블의 충격계수는 노면조도, 차량속도 및 차량간격의 설계변수에 의해 큰 영향을 받으며 영향선 기법과는 상이한 결과를 보였다. 따라서 향후 다수의 사장교 모델과 보다 많은 매개변수를 고려한 해석이 필요할 것으로 판단되며, 본 연구에서 고려한 교량모델에 대한 매개변수 해석 결과를 토대로 그 특징을 비교·분석하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 차량 중량이 케이블 충격계수에 미치는 영향은 케이블 위치에 따라 차이를 보였으며, 경량 차량은 주탑 부근의 케이블에서, 중량 차량은 교량 중앙부 및 종점부 케이블에서 충격계수가 상대적으로 크게 나타났다.
- (2) 케이블 자체 진동은 사장교 케이블 충격계수에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

- (3) 사장교 케이블 충격계수에 대한 차량 이동하중 횡방향 재하 위치의 영향은 미소한 것으로 나타났다.
- (4) 노면조도가 증가할수록 사장교 케이블의 충격계수는 증가하였으며, 영향선 기법은 200m급에 대해 Road Class C의 결과에 근접하고, 500m급에 대해 Road Class B의 결과에 근접하는 것으로 나타났다. 이것은 영향선 기법이 교량의 지간이 짧은 경우의 충격계수를 긴 경우에 비해 상대적으로 크게 평가하는 것을 의미한다.
- (5) 주행차량의 속도가 60~90km/h로 증가할 때 200m급 사장교에 대해서는 모든 위치의 케이블에서 충격계수가 일정하게 증가하였다. 반면에 500m급에서는 주탑 부근의 케이블은 충격계수가 비교적 일정하게 증가하였으나, 그 이외 구역의 케이블은 일관된 결과를 보이지 않는 것으로 나타났다. 특히, 500m급의 시·종점부 케이블은 차량 속도가 증가함에 따라 영향선 기법 결과를 현저히 상회하는 것으로 나타났다.
- (6) 본 연구에서 고려한 차량간격 변수해석에서는 그림 19와 같은 차량 재하 위치에서 특정 차량간격(본 연구의 경우 200m급에 대해 190~210m, 500m급에 대해 200~600m)에 대해 시·종점부 케이블의 충격계수가 영향선 기법 결과를 현저히 상회하는 것으로 나타났다.

이상으로부터 주요 설계변수를 고려하지 못하는 영향선 기법으로 사장교 케이블의 충격계수를 적합하게 평가하는 것은 무리가 있다고 판단된다. 따라서 사장교 케이블의 충격계수는 케이블에 최대인장응력이 발생할 시를 기준으로 다수의 랜덤 생성된 노면형상과 교량의 동적 거동에 영향을 주는 주요 설계변수를 고려하여 교량-차량 상호작용 해석을 수행하고 그 결과들의 통계적 수치로써 평가되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 '부산대학교 자유과제 학술연구비'의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 건설교통부 부산지방국토관리청(1991) 창선~삼천포간 교량기설 공사 2공구 설계변경 구조계산서.
 대한토목학회(2008) 도로교설계기준·해설.
 박영석, 정태주(1996) 노면조도를 고려한 강판형교의 충격계수에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제16권, 제 I-1호, pp.43-54.

북항아이브리지주식회사(2007) 북항대교 민간투자사업 구조계산서.
 장승필, 김철영, 김남식(1990) 이동하중에 의한 사장교의 동적
 거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제2권, 제1
 호, pp.93-102.

황의승(1991) 교량의 충격하중 계수에 대한 연구, 한국강구조학
 회논문집, 한국강구조학회, 제3권, 제4호, pp.205-212.

Calçada, R., Cunha, A., and Delgado, R. (2005)
 Analysis of Traffic-Induced Vibrations in a
 Cable-Stayed Bridge, Part I: Experimental
 Assessment, *Journal of Bridge Engineering*,
 ASCE, Vol. 10, No. 4, pp.370-385.

Calçada, R., Cunha, A., and Delgado, R. (2005)
 Analysis of Traffic-Induced Vibrations in a
 Cable-Stayed Bridge, Part II: Numerical
 Modeling and Stochastic Simulation, *Journal of
 Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 10, No. 4,
 pp.386-397.

Dodds, C.J. and Robson, J.D. (1973) The Description
 of Road Surface Roughness, *Journal of Sound
 and Vibration*, Vol. 38, No. 2, pp.175-183.

Ernst, M.J. (1965) The E-Modulus of Cables
 Considering the Deflection, *Der Bauingenieur*,
 Vol. 40, No. 2, pp.52-55.

European Committee for Standardization (CEN). (2001)
 EUROCODE 1-Actions on structures-Part 2:

General action-Traffic loads on bridges, Draft
 prEN 1991-2, Doc CEN/TC250/SCI/N318,
 European Committee for Standardization, Brussels.

Guo, W.H. and Xu, Y.L. (2001) Fully Computerized
 Approach to Study Cable-Stayed Bridge-Vehicle
 Interaction, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.
 248, No. 4, pp.745-761.

ISO 8608. (1995) Mechanical vibration -Road surface
 profiles- Reporting of measured data.

Mulcahy, N.L. (1983) Bridge Response with
 Tractor-Trailer Vehicle Loading, *Earthquake
 Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 11,
 pp.649-665.

Wang, T.L. and Huang, D.Z. (1992) Cable-Stayed
 Bridge Vibration due to Road Surface Roughness,
Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.
 118, No. 5, pp.1354-1374.

Yang, F. and Fonder, G.A. (1996) An Iterative
 Solution Method for Dynamic Response of
 Bridge-Vehicles Systems, *Earthquake Engineering
 and Structural Dynamics*, Vol. 25, pp.195-215.

(접수일자 : 2010. 9. 21 / 심사일 2010. 10. 7 /
 심사완료일 2011. 3. 29)