일사에 의한 온도변화에 따른 강사장교의 동적특성 변화

Modal Parameter variation of Steel Cable-stayed Bridge Considering Solar Radiation

김 상 효* · 조 광 일** · 박 주 양**
Kim, Sang-Hyo · Jo, Kwang-Il · Park, Ju-Yang

ABSTRACT

Bridges are exposed to constantly changing weather conditions and temperature. The temperature change is induced by a change in atmospheric temperature and solar radiation. Atmospheric temperature change acts on the whole structure. Thus, it is relatively easy to consider in the design. Solar radiation, however, causes un-uniform temperature distribution in the structure, depending on the shape of the structure and its shadows. Un-uniform temperature distribution causes a torsional moment in bridge section and a deformation of bridge. A deformation can make differences of dynamic and static behavior of bridge.

In this study, the method for analysis of static and dynamic behavior considering deformation and changes of material properties due to temperature variation was developed. By this method, it is found from dynamic analysis results that the change of frequency in analysis model is similar with test results of public used cable-stayed bridge. When a temperature goes down, a frequency goes up. And it is found that the change of frequency is affected by the change of material properties.

Keywords: *Solar radiation, Cable-stayed bridge, Temperature distribution, Natural frequency*

1. 서 론

현대사회의 급속한 경제발전과 교통량의 증가는 사회기반 시설물에 대한 질적 · 양적인 증가를 요구하고 있으며 이에 따라 새로운 사회기반시설이 계속 확충되고 있다. 특히 점점 더 그 중요성이 증대되고 있는 교통의 경우 고속철도의 신설과 항공편의 증대 등 새로운 수단이 제시되고 있으나 기존의 도로교통의 비중은 오히려 더 증가하는 추세이며 일반국도·고속도로의 신규건설 및 확장의 증가가 이를 반증하고 있다. 또한 산과 강이 많고 도서지역이 많은 국내지형특성과 선형적인 도로 건설로 인하여 현재 건설되는 도로는 교량으로 건설되는 구간이 많아지고 있고 이러한 교량들은 최근 경제발전과 더불어 경제성 뿐만 아니라 미관을 고려하여 건설되고 있다. 이에 따라 서해대교, 진도대교, 삼천포대교 등 사장교와 광안대교, 영종대교 등 현

* 정회원 · 연세대학교 토목공학과 교수 E-mail: sanghyo@yonsei.ac.kr
** 학생회원 · 연세대학교 토목공학과 박사과정 E-mail: cky222@yonsei.ac.kr
*** 정회원 · (주)삼보기술단 기사 E-mail: juyang@yonsei.ac.kr

수교가 건설되었고 계획중인 특수교량도 다수 있다. 이러한 장대교량은 중·소형 교량에 비해 온도에 의한 구조적 거동이 복잡함에도 불구하고 이에 대한 연구는 부족한 실정이다. 특히 사장교의 경우 일사에 의한 주탑과 주형 단면의 불균등한 온도분포에 의한 비틀림응력이 발생할수 있고, 또한 불균등한 온도분포와 주탑과 주형, 케이블등의 구조요소들 사이의 온도차이로 인하여 구조물의 강성이 변화할 수 있다. 이러한 사장교의 강성변화는 구조물의 고유주기를 변화시켜 지진이나 바람등 동적하중하에서 불리한 거동을 나타낼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 일사를 고려한 온도예측기법을 바탕으로 온도분포를 3차원 구조해석에 적용함으로써 온도하중이 사장교의 동적 특성의 변화에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 일사에너지의 기본이론

일사는 태양빛이 지구대기의 영향을 받아 생기는 복사에너지로 대기에 흡수 혹은 반사의 영향을 받지 않는 직접일사(beam radiation), 대기에 의해 흡수되거나 반사되어 대기에 규일하게 분포되는 분산일사(diffuse radiation)와 직접일사와 분산일사에 의해 지표면에 반사되는 지면반사일사(reflected radiation)의 세 가지 형태로 구분할 수 있다. 직접일사는 대기에 의해 산란(散亂)되지 않은체 지면에 산란되어 균일하게 대기에 분포되는 햇빛으로 직접 닿지 않는 실내에서도 밝게 보일 수 있게끔 한다. 위 세 가지 일사중 직접일사성분이 비선형온도분포의 주된 영향인자이지만, 분산일사와 지면반사일사의 영향 또한 무시할 수 없는 정도이다.

교량 외면은 일사의 영향을 받아 온도경사가 발생하여 교량전체에 비선형 온도분포를 가지게 된다. 이를 분석하기 위해 Emanual과 Hulsey(1978), Moorty와 Roeder(1992)등은 경사면의 일사에너지(q_s)를 식 (1), 식 (2)를 사용하여 계산하였다.

$$q_s = a\, I_t \tag{1}$$

$$I_t = I_b \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} + I_d\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + I_p\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \tag{2}$$

여기서, 식(1)의 a는 물체의 흡수도, I_t는 경사면에서의 직접일사, 분산일사와 지면반사일사를 포함한 전체 일사량이다. 식(2)의 I_t는 경사면의 일사량(W/m^2), I_b는 수평면의 직접일사량(W/m^2), I_d는 수평면의 분산일사량(W/m^2), I는 수평면의 전체일사량 ($I = I_b + I_d$), β는 경사면과 수평면의 사이 각, ρ는 지면의 반사율, θ는 경사면의 법선과 일사방향이 이루어진 각, θ_z는 천정각(zenith angle : 일사와 수평면법선 사잇각)이다. 본 논문에서는 일반적으로 설계실무에서는 밝은 색 계열의 도료를 사용하므로 일사흡수도(a)를 0.5로 하였고, 지면의 반사율(ρ)은 Duffie와 Beckman(1980이 제안한 값인 0.2를 사용하였다.

3. 일사에 의한 사장교의 온도분포

대기온도의 변화는 교량구조물 전체에 일정하게 가해지므로 설계에 있어 예측 및 적용이 용이한 반면, 일사에 의한 온도변화는 단면 형상 및 그림자의 영향으로 인하여 교량단면에 비선형 온도분포를 발생시킨다. 특히 중·소형 교량에 비해 동적거동이 중요한 사장교의 경우에는 단면의 불균등한 온도분포로 인하여 교량에 불리한 거동이 나타날 수 있다.

3.1 대표단면의 온도분포 예측기법

본 연구에서는 사장교의 3차원 온도분포를 해석함에 있어 사장교의 열전달특성을 대표할 수 있는 단면을 선정한 후, 이를 대상으로 2차원 열전달해석을 수행하여 단면의 온도분포를 구하고 간단한 계산과정을 통하여 대표단면의 결과를 교축방향으로 확장하는 기법을 사용하였다. 일사에 관한 이론식에 의해 산출되는 에너지를 유한요소해석에 적용시켜 대표단면의 온도분포를 구하였다.

3.1.1 이론식을 이용한 일사에너지

사장교 대표단면의 온도분포를 예측하기 위해 이전연구의 방위각과 경사각 및 일사에너지 산출식을 이용하여 교량단면에 유입되는 일사에너지를 계산하는 프로그램을 사용하였다. 교축방향으로 단면의 변화가 없는 경우 대표단면의 방위각은 편의상 양쪽 복부판이 각각 정남향, 정북향인 것으로 가정하였다. 대표단면의 선정 후에는 그림 1에서와 같이 단면을 구성하는 각 면에 대해 일사의 종류, 방위각, 경사각 등을 세부적으로 분류하였다.

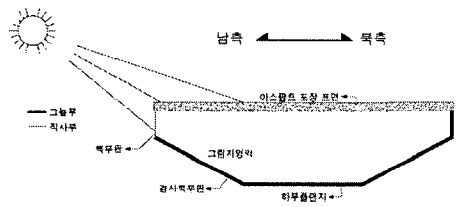


그림 1 일사에 대한 교량 단면 각 부위의 분류그림

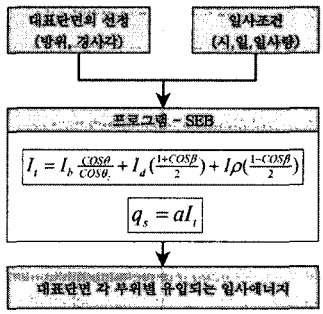


그림 2 프로그램 SEB의 흐름도

그림 1에 표시된 그림자영역은 직접일사의 영향은 받지 않으며 분산일사와 지면반사일사만을 받는 부분이다. 일반적인 강박스 교량의 경우에는 복부판의 높이가 높고 캔틸레버부의 길이가 짧아 태양일사가 복부판에도 직접 도달할 수 있다. 그러나 사장교의 경우는 내풍설계로 인하여 일반적으로 거더의 높이가 낮아지게 되고 이로 인하여 대상교량의 경사진 복부판에는 태양고도가 매우 낮은 해뜰무렵이나 해질 무렵 이외에는 태양일사가 직접 도달하기 힘들다. 따라서 사장교 단면의 온도분포는 좌우의 온도변화보다는 상하의 온도변화가 뚜렷하여 온도분포가 상대적으로 단순하고 휨거동이 지배적일 것으로 예상된다.

경사각은 일사에너지가 유입되는 교량외면과 수평면사이에 이루어지는 각으로 경사각이 0°일 경우에는 수평면을 뜻하고 180°일 경우에는 교량외면이 지면을 향하고 있다는 것을 뜻한다. 지면반사일사는 경사각이 180°인 하부플랜지의 하면과 경사진 복부판에 가장 많은 영향을 미치지만 경사각이 수평면에 근접한 아스팔트 포장 표면에 미치는 영향은 극히 미소하다. 한편 직접일사는 시간에 따라 변화하는 일사의 입사각과 방위각이 일치할수록 그 영향이 커져 복부판에 비선형온도분포를 일으키는 주요인자이다.

대표단면의 방위와 경사각과 일사조건을 정한 후 SEB을 통해 그림 2와 같은 방법으로 대표단면 각 부위에 유입되는 일사에너지를 구한다. 개발된 프로그램(SEB : Solar Energy calculation program for Bridge section)은 일사에너지의 이론식을 바탕으로 구성되어 있어 직접일사, 분산일사 및 지면반사일사를 각각 분리계산하여 열전달해석에서 하중으로 적용하였다.

3.1.2 FEM을 이용한 대표단면 온도분포의 열전달해석

SEB으로부터 대표단면의 교량부위별 에너지를 구하고 그림 3과 같이 유한요소 모델에 에너지하중으로 적용하여 열전달해석을 수행하였다. 열전달해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 LUSAS(v13.5)를 사용하였으며 2차원 열전달요소인 plane field요소로 교량의 대표단면을 모델링하였고 이러한 열전달해석으로부터 그림 3와 같은 대표단면의 온도분포를 구할 수 있다.

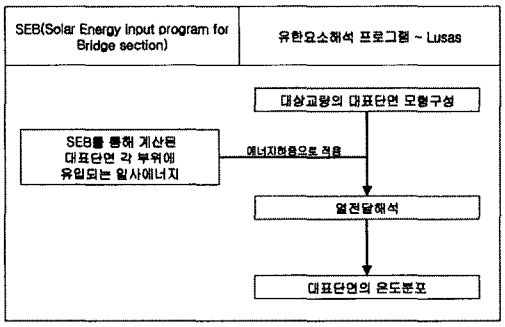
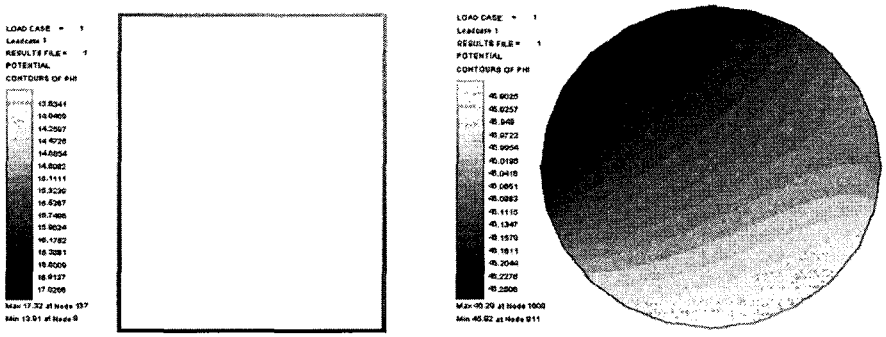


그림 3 대표단면의 온도분포 예측방법 흐름도

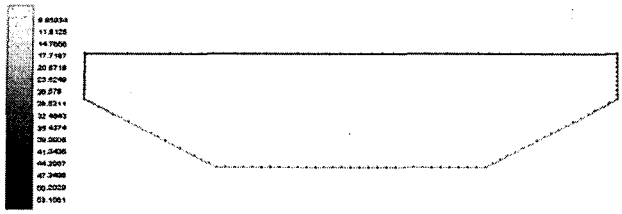
3.2 대상교량의 구조해석 모델링

대상교량의 구조해석 모델링은 LUSAS(v13.5)를 이용하여 수행하였다. 대표단면의 해석결과 각 구조요소 단면의 온도분포는 그림 4와 같이 나타났다. 주탑과 거더 단면의 온도분포는 불균등하게 나타난 것에 비해 케이블의 온도분포는 비교적 일정한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 주탑과 거더 불균등한 온도분포를 고려하기 위해 thick shell을 이용하여 모델링 하였고 케이블은 thick nonliear beam을 이용하여 모델링하고 단면의 평균온도를 적용하였다. 이렇게 구한 대표단면의 온도분포를 3차원 구조해석 모델에 적용하고 온도변화에 따른 구조물의 변형형상을 고려하기 위해 비선형 해석을 수행하였다. 대상교량의 모델은 거더와 주탑을 shell로 모델링을 하여 일사에 의한 단면의 불균등한 온도분포를 적용할 수 있어 보다 정확한 거동분석이 가능하지만 동적해석까지 수행하기에 해석시간이 오래 소요되는 단점이 있다.



(a) 주탑 단면의 온도분포(단위:℃) (b) 케이블 단면의 온도분포(단위:℃)

그림 4 열전달해석으로 예측된 온도분포



(c) 거더 단면의 온도분포(단위:℃)

그림 4 열전달해석으로 예측된 온도분포

4. 일사에 의한 사장교의 동적특성 변화

4.1 대상교량의 고유주기 변화 계측결과

대상교량 계측시스템의 동적계측 항목으로는 거더의 가속도, 주탑의 가속도, 거더의 변형율, 케이블의 가속도, 풍향풍속, 지진 가속도 등이 있다. 대상교량의 연직방향의 휨모드에 대한 고유진동수를 구하기 위하여 거더의 양쪽 가속도계의 데이터를 평균하여 매주의 event 파일에 대하여 푸리에변환(FFT, fast fourier transform)을 하였다. 1방향 가속도계를 수직방향으로 설치하였기 때문에 고유진동수는 연직방향 진동모드가 산정되었다. 계측된 자료로부터 연직방향 1차모드의 월평균 고유진동수는 표 1과 같다.

표 1 대상교량의 월별 고유진동수의 변화

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
1999년	–	0.51	0.51	0.51	0.51	0.49	–	0.49	0.51	0.51	0.51	0.51
2000년	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	–	–	0.49	0.51	0.49	0.51	0.51

대상교량의 연중 고유진동수 변화량은 약 4% 정도로 나타났다. 이와 같은 결과는 외국의 연구결과(Peeters, 2001)나 국내의 연구결과(박종칠, 2004)과도 유사한 경향으로서 계측자료를 이용한 서해대교 사장교 구간의 구조거동평가(박종칠, 2004)에서는 사장교의 고유진동수 평균값에 대한 월별 고유진동수 변화율이 1차모드에 대해서 -1.1~1.0%, 2차모드에 대해서 -1.8~0.6%으로 나타났다. 이는 비교적 작은 값이지만, 수치해석모델에서 단면강성을 저하시키거나 케이블 파단을 가정하여 해석한 결과로 나타나는 고유진동수의 변화량 0~2%(대림산업, 2001)와 비교해 볼 때 상당히 큰 값이다. 또한 본 대상교량의 계측결과, 서해대교의 고유진동수보다 변화가 더 심한 것으로 나타났다.

4.2 온도변화에 의한 고유주기 변화

구조물의 온도변화는 재료특성의 변화와 경계조건의 변화 및 구조물에 열변형 거동을 야기시키며 그 결과로 고유진동수와 모드형상 및 감쇠계수와 같은 진동모드 특성의 계측에서 불확실성을 유발시킨다. 김정태 등(Kim et al., 2003)은 이러한 영향을 분석하였는데 계측온도에 따른 강판형 모형교의 진동특성치의 분석 결

과 고유진동수는 온도가 감소하면 고유진동수는 증가하고 온도가 상승하면 그와 반대로 감소하는 것을 잘 보여주고 있다. 대상교량 역시 주부재가 모두 강재로 이루어졌으므로 이와 비슷한 결과를 예측해볼 수 있다.

계측자료를 이용한 서해대교 사장교 구간의 구조거동 평가(박종칠, 2004)는 서해대교의 장기거동을 측정하였다. 이 연구에 의하면 온도변화와 고유진변화사이의 상관관계는 서로 음의 상관관계를 가지는 것으로 밝혀졌다. 또한 고유진동수의 평균값에 대한 월별 고유진동수 변화율은 비교적 작은 값이지만 이는 수치해석 모델에서 단면강성을 저하시키거나 케이블 파단을 가정하여 해석한 결과로 나타나는 고유진동수의 변화량과 비교해 볼 때 상당이 큰 값이다. 따라서 고차의 부정정 구조물에서 동특성으로 인한 상태평가나 손상탐지를 할 경우, 온도에 의한 고유진동수 변화를 반드시 고려해야 한다(박종칠, 2004).

4.2.1 온도변화에 의한 변형형상을 고려한 고유주기 변화

본 연구에서는 연중 온도변화에 의한 고유주기의 변화를 해석적으로 구현하였다. 8월의 평균일사량에 의해 온도가 증가한 경우와 12월의 밤시간 온도가 가장 감소한 경우 사이의 변화율을 연중 고유주기 변화율로 산정하였다. 이러한 온도변화 범위에 따라 온도변화에 의한 변형형상을 고려한 고유주기해석을 수행한 결과, 그림 5와 같이 일사에 의한 온도변화에 의해서는 고유주기의 변화율이 0.2% 미만인 것으로 나타났다.

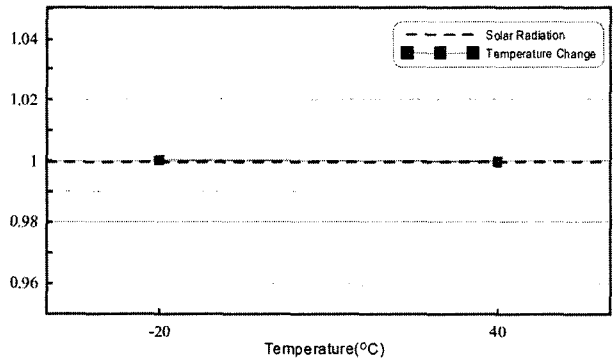


그림 5 일사를 고려한 온도변화에 의한 고유진동수 변화

4.2.2. 온도변화에 의한 탄성계수의 변화를 고려한 고유주기 변화

강재는 온도변화에 따라 항복강도, 탄성계수와 연신율등 재료의 물성치가 변화하는 것으로 알려져 있다. 현재 구조물의 정적거동 분석시 온도변화에 의한 탄성계수의 변화는 무시되고 있지만 동적해석을 수행할 경우 이러한 탄성계수의 변화를 고려함으로써 보다 실제적인 구조물의 동적거동을 재현할 수 있다. 본 연구에서는 일사에 의한 대상 사장교의 동적거동변화를 보다 정확히 모사하기 위해 이전 연구들에서의 온도변화에 따른 탄성계수의 변화율을 적용하여 동적특성 변화를 분석하였다. 외국의 Ku-Chen Yang(2005)의 연구에서는 온도가 -50℃에서 25℃로 증가함에 따라 탄성계수가 10% 감소하는 것으로 나타났고 국내의 장경호(2004) 등의 연구에서는 온도가 0℃에서 100℃로 증가함에 따라 10%의 탄성계수의 감소가 발생하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 연교차에 의한 동적특성변화를 분석하므로 이러한 탄성계수의 변화를 선형으로 간주하여 온도가 100℃ 증가할 때 10%의 탄성계수가 감소는 것으로 가정하여 적용하였다.

온도가 증가함에 따라 강재의 탄성계수는 감소하게 되며 구조물의 강성이 감소하게 된다. 이에 따라 구

조물의 고유진동수 또한 감소하게 된다. 이러한 고유진동수의 변화는 고유주기 변화를 야기하는 여러 인자 중 온도변화에 따른 재료의 탄성계수변화에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

현행 설계기준에는 온도변화에 의한 동적특성 변화를 고려하는 항목이 제시되어 있지 않지만 계측치와 해석결과에서 연중 고유주기의 변화가 확인되었다. 본 연구에서 제시한 일사를 고려한 온도변화에 의한 고유주기 변화 산정 방법은 실제 사장교의 거동을 잘 반영하는 것으로 나타났지만 설계에 적용하기에는 절차가 복잡하여 어려움이 있다. 따라서 현행 도로교설계기준의 전체온도변화 관련규정을 이용하여 온도변화에 따른 고유주기 해석을 수행하고 이를 일사를 고려한 경우의 고유주기 변화율과 비교하였다. 도로교설계기준의 가설시 온도를 기준으로 전체온도변화를 적용하는 규정에 따라 10℃를 가설온도로 가정하고 -20℃와 +40℃의 온도변화를 적용한 경우의 고유주기 변화율을 산정하였다. 해석결과, 설계기준에 따른 연직방향 1차 고유주기 변화율은 약 3.0%로서 일사를 고려한 연중고유주기 변화율에 비해 작은 것으로 나타났지만 주요모드의 변화율은 일사를 고려한 경우보다 큰 것으로 나타났다. 따라서 온도변화에 따른 사장교의 동적특성 분석시에 현행설계기준의 온도변화관련 규정을 적용하여도 큰 무리가 없는 것으로 판단된다.

표 2 일사를 고려한 온도변화에 의한 검토 대상 모드의 고유진동수

Mode		frequency			변화율 (%)
no.	방향	온도변화 없는경우	-20℃	일사	
1	교축직각	0.3423	0.3654	0.3572	2.3
2	연직	0.5057	0.5106	0.4943	3.3
5	교축직각	0.8257	·0.8339	0.8215	1.5
7	연직	1.1685	1.1803	1.1431	3.3
8	교축	1.4068	1.4393	1.4168	1.6
10	교축직각	1.7282	1.7442	1.7274	1.0
15	연직+교축	2.1457	2.1661	2.1195	1.6
19	연직+교축	2.8860	2.9077	2.8619	1.6
22	연직+교축	3.2920	3.3186	3.2573	1.9
30	연직+교축직각	4.3059	4.5212	4.4249	2.2
40	비틀림+교축직각	5.5959	5.7605	5.6416	2.1

표 3 설계기준의 온도변화 규정에 의한 검토 대상 모드의 고유진동수

Mode		freauency		변화율
no.	방향	-20℃	+40℃	(%)
1	교축직각	0.3654	0.3550	2.9
2	연직	0.5106	0.4957	3.0
5	교축직각	·0.8339	0.8096	3.0
7	연직	1.1803	1.1455	3.0
8	교축	1.4393	1.1431	1.9
10	교축직각	1.7442	1.6967	2.8
15	연직+교축	2.1661	2.1059	2.9
19	연직+교축	2.9077	2.8506	2.0
22	연직+교축	3.3186	3.2396	2.4
30	연직+교축직각	4.5212	4.3975	2.8
40	비틀림+교축직각	5.7605	5.6047	2.8

5. 결론

본 연구는 일사에 의한 온도변화에 의한 거동특성 변화 분석을 위한 방법론을 정립하였으며, 정립된 방법론에 따라 고유진동수의 변화를 해석적으로 구현하고 계측치와 비교하였다. 또한 일사를 고려한 온도변화에 의한 사장교의 정적거동과 지진거동을 분석하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 일사에 의한 온도분포에 의한 사장교의 거동특성 변화를 온도변화에 따른 변형형상과 탄성계수 변화를 고려하여 분석할 수 있는 방법론을 정립하였으며, 대상교량에 대한 해석적 분석 결과와 실 계측자료를 비교하여 제시된 방법론의 타당성을 검증하였다.

2. 온도변화에 의한 대상사장교의 동적 특성 변화를 분석한 결과에서는 실제적인 불균등한 온도분포를 가지는 경우와 설계기준에서 제시되는 균등한 온도분포를 가지는 경우가 유사한 고유주기 변화율을 보이고 있다. 따라서 온도변화에 의한 사장교의 동적 특성 변화분석시 현행 도로교설계기준의 전체온도변화와 관련된 규정을 적용할 수 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

건설교통부 (2000) 도로교설계기준, **건설교통부**

박종칠, 박찬민, 송필용 (2004) "계측자료를 이용한 서해대교 사장교 구간의 구조거동 평가", **대한토목학회**, 2004, 3, pp. 249~257

여영건 (2003) "일사를 고려한 강박스거더교의 온도거동에 관한 연구", **연세대학교 대학원**, 석사학위 논문.

Chang, C.C., Chang, T.Y.P., and Zhang, O.W. (2001) "Ambient vibration of long-span cable-stayed bridge", *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 6, No.1, pp. 46~53.