

해석 데이터의 통계적 방법을 통한 PSC 박스거더교의 설계 온도 하중 추정

Estimation of Design Thermal Loads on PSC Box Girder Bridges by Statistical Extrapolation of Analytical Data

황 의 승^{*} 임 창 균^{**} 이 영 수^{***}
Hwang, Eui Seung Im, Chang Kyun Lee, Yung Soo

ABSTRACT

This paper describes the procedures to estimate for the design thermal loads on prestressed concrete box girder bridges on the basis of the extreme analysis of the temperature data obtained from long-term thermal analyses. Long-term thermal analyses using the environmental data for three years were conducted, and the extreme distributions of the thermal loads are then determined by the tail-equivalence method, and the thermal loads corresponding to selected return period are calculated. Finally, the results are compared to the specifications suggested in a current design code for thermal loads.

1. 서론

대기온도, 태양일사, 풍속 등의 영향에 대한 교량의 설계온도하중 기준 개발은 최근 많은 관심을 불러일으키고 있다. 교량의 온도분포에 영향을 미치는 환경변수는 일별, 계절별 및 연도별 변화를 나타내기 때문에, 이와 같은 환경변수의 지배를 받는 온도하중은 무작위 변수(random variables)로 고려되어야 한다. 따라서, 온도하중에 관한 합리적인 결론은 통계 해석에 바탕을 두고 도출될 수 있다.

본 논문에선 기상자료를 이용한 장기 해석 자료를 이용하여 교량의 설계온도하중을 추정하는 기법에 대해 기술하였다. 설계하중 값을 구하기 위해 수행한 통계적 외삽(statistical extrapolation)의 기본 접근방법은 확률지를 이용한 Tail-equivalence법을 적용하여, 비교적 손쉽게 얻을 수 있는 기상자료를 입력자료로 고려한 시간별 열 전달 해석 결과를 이용하였다. 기상자료를 이용함으로써 수년간의 온도계측을 수행하지 않고서도 온도하중의 통계적 외삽에 이용되는 장기간의 교량 온도 데이터를 얻을 수 있었다. 우선, 2차원 유한 요소 해석을 통해 얻는 단면의 온도 분포로부터 교량의 온도거동 특성을 나타내는 온도하중 매개변수를 정의하고, 통계적 외삽을 통해 임의의 재현기간에 해당하는 각 온도하중 매개변수의 극치값을 계산하였다. 마지막으로 이 결과를 현행 시방서의 규정과 비교하였다.

* 정회원, 경희대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 현대산업개발(주) 기술연구소 과장

*** 정회원, 현대산업개발(주) 토목설계팀 이사대우

2. 장기 온도 해석

비교적 손쉽게 얻을 수 있는 기상자료인 기온, 태양일사량 및 풍속을 이용한 온도해석결과를 극치해석에 이용하면, 장기간의 실 교량 실험을 통하지 않고도 효율적이고 신뢰성 높은 콘크리트 박스거더교량의 설계온도하중을 추정할 수 있다. 열 전달 해석 모델은 기 수행된 연구결과¹⁾에서 보인 2차원 유한요소 해석모델을 이용하였다 지역적 편차를 고려하기 위하여 서울, 대관령, 대전, 그리고 목포 관측소의 3년간의 기온과 일사량 데이터를 장기 온도 해석에 이용하였다. 교량단면에 대한 열 전달 해석과정과 해석에서 고려한 콘크리트 교량의 단면 및 유한요소모델은 참고문헌 1) 에 자세히 수록되었다.

유한요소모델의 절점 온도값 T 로부터, 교량단면의 온도변화에 의한 거동을 Navier-Bernoulli의 가정을 적용하여 축방향 변형도 및 곡률에 대응하는 온도하중 매개변수(단면평균온도 T_0 와 수직, 수평선형 온도차 ΔT_v , ΔT_h)를 아래 식(1)부터 식(3)와 같이 정의하였다.

$$T_0 = (\sum_i T_i A_i) / A \quad (1)$$

$$\Delta T_v = (-D \sum_i T_i \bar{y}_i A_i) / I_h \quad (2)$$

$$\Delta T_h = (-W \sum_i T_i \bar{x}_i A_i) / I_v \quad (3)$$

여기서, i 는 2차원 유한요소 모델의 각 절점, T_i 는 절점 i 에서의 온도, I_h 및 I_v 는 각각 수평 및 수직 축에 대한 단면 2차 모멘트, W 및 D 는 각각 단면의 폭 및 높이이다.

위의 식들로부터, 열 전달 해석에서 시간 간격으로 구한 단면 절점 온도를 온도하중 매개변수로 변환하여, 등가의 변형도 값과 함께, 대전 지역의 결과를 그림 1에 예시하였다. 이외의 지역에 대한 자료는 참고문헌 1)에서 보이고 있다.

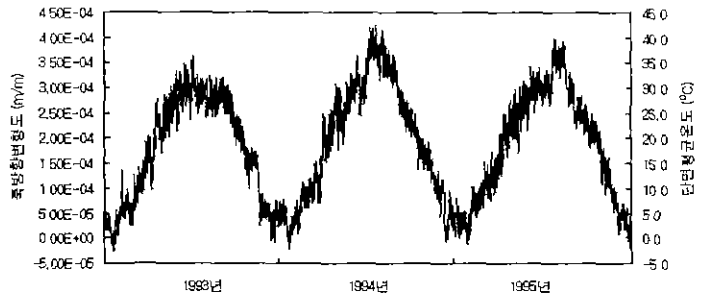


그림 1 시간별 축변형률 및 단면평균온도(°C) (대전)

3. 해석 데이터의 통계적 외삽(Statistical Extrapolation)

장기 온도해석 데이터를 이용한 온도하중의 통계적 외삽을 수행하기 위해, 우선 시간별 온도하중 매개변수 자료의 peak값들을 규명하고 순서대로 나열하는 작업이 선행되었다. 그림 1에 보인 시간별 자료로부터 독립된 peak값들을 선정하고 약 0.5%인 30개의 peak 값을 크기 순으로 나열하였다. 이 데이터의 극치분포 형태의 결정은, Resnick²⁾의 연구결과로부터 세 가지 극치분포(즉, Gumbel, Weibull 및 Frechet)중의 하나가 주어진 데이터의 확률분포의 꼬리(tail) 부분과 도식적으로 일치한다면, 이 극치분포를 주어진 데이터의 극치분포로 볼 수 있다는 가정을 적용하였다. 즉, Gumbel 확률지에 대해 도시된 데이터의 누적확률분포곡선의 곡률로부터 결정될 수 있다. 따라서, 각 온도하중 매개변수의 최대 혹은 최소 값에 대한 Gumbel 확률지 도시로부터 결정된 극치분포의 형태를 표 1에 정리하였다. 단면평균온도의 최대값에 대해 Weibull 형태를 보인 반면, 단면평균온도의 최소값, 수직 및 수평선형 온도차는 Gumbel 분포를 보이고 있다. 수평선형 온도차의 경우 최대 및 최소는 단지 기준 좌표축의 방향

에 따라 결정되므로, 최대 및 최소값에 관계없이 모두 Gumbel 형태를 보이고 있다.

다음 단계로, Gumbel 분포의 경우는 location parameter α 와 scale parameter β 를 그리고 Weibull 분포의 경우 location parameter λ 와 scale parameter δ 그리고 shape parameter γ 와 같은 극치분포의 상수를 아래 식(4)로 표현되는 오차량 E_r 을 최소화 하는 조건으로부터 결정하였다. 오차량의 최소 조건을 만족하는 상수의 결정은 수치적 반복계산에 바탕을 둔 최적화 기법³⁾을 이용하였다.

$$E_r = \sum_{i=1}^{i^*} w_i [F(x, \theta) - p_i] \quad (4)$$

여기서, p_i 는 peak 데이터의 누적확률분포값, i^* 는 극치분포의 결정에 이용되는 peak 데이터 수로, 앞서 언급한 바와 같이 30개를 이용하였다. $F(x, \theta)$ 는 Gumbel 또는 Weibull분포를 나타내며 θ 는 이 극치분포의 상수 열을 나타낸다. 가중치 w_i 는 tail equivalence의 개념으로부터 $w_i = 1 / ((1 - p_i)^2)$ 을 적용하였다.⁴⁾

수치 최적화 기법을 이용하여 식(4)을 만족하는 극치분포의 상수를 구하는 경우, 각 상수의 초기치는 전체 최적화 과정에 매우 중요하게 작용한다. 특히, 초기 값이 적절히 주어지지 않은 경우 최적의 해를 찾지 못하는 경우가 있다. 따라서, 식(4)에서 가중치, $w_i=1$ 인 경우에 Gumbel 확률지에서 직선으로 나타나는 Gumbel 분포의 경우 Gumbel 확률지의 종축=0에 대응하는 횡축의 값이 α 를 그리고 종축=1에 대응하는 횡축의 값이 $\alpha + \beta$, 즉 기울기가 $1/\beta$ 인 조건으로부터 초기치를 결정하였다. Weibull 분포의 경우, 횡축을 $-\ln(\lambda - x)$ 로 변환하고, Weibull 확률지에서 직선이 되도록 λ 의 초기치를 정하고 Gumbell 확률지와 유사하게 종축=0일 때의 횡축의 값을 $-\ln \delta$ 로 그리고 종축=1일 때 횡축의 값을 $1/\gamma - \ln \delta$ 라는 조건으로부터 각각 δ 와 γ 의 초기치를 결정하였다. 이 과정에서 λ 를 결정하는 데 다소 오차가 포함될 수 있지만 최종 극치값에 미치는 영향은 무시할 만큼 작았다. 이와 같이 결정한 계수들을 통해, 재현기간 50년 및 100년에 해당하는 온도하중 매개변수값은 표 2과 같다.

표 1 Domain of Attraction Type

기상관측소 매개변수	대전	서울	목포	대관령
최대 단면평균온도	Weibull	Weibull	Weibull	Weibull
최소 단면평균온도	Gumbel	Gumbel (Weibull)	Gumbel	Gumbel
최대 수직선형온도차	Gumbel	Gumbel (Weibull)	Gumbel	Gumbel
최대 수평선형온도차	Gumbel	Gumbel	Gumbel	Gumbel

표 2 재현기간에 대한 온도하중 매개변수의 극치값

	재현기간 (년)	대전 (°C)	서울 (°C)	목포 (°C)	대관령 (°C)
최대 평균온도	50	42.8	42.7	43.0	36.2
	100	42.8	42.8	43.0	36.3
최소 평균온도	50	-7.6	-8.4	-2.0	-13.8
	100	-8.3	-9.1	-2.6	-14.6
최대 수직 선형온도차	50	12.1	10.2	11.5	11.7
	100	12.4	10.4	11.8	12.1
최대 수평 선형온도차	50	1.6	1.3	1.4	1.4
	100	1.6	1.3	1.5	1.5

4 설계 온도 하중

표 2에 보인 온도하중 매개변수의 극치값, 즉 설계온도하중에 대한 검토를 위해서 현재 도로교표준시방서⁵⁾에서 고려하고 있는 온도하중 규정과 비교하였다. 이 표에서 최대 평균온도는 대전, 서울 그리고 목포의 경우 재현기간에 대해 큰 변화 없이 42°C에서 43°C를 보이고 있다 반면에 한냉한 지방에

속하는 대관령의 경우 재현기간에 따라 약 36°C에서 37°C의 변화를 보이고 있다. 이 결과는 도로교시방서에서 보통지방 및 한냉한 지방에 대해 모두 35°C의 최대 평균온도를 정의하고 있는 규정과 큰 차이를 보이고 있으며, 본 연구의 결과를 토대로 보통지방의 경우 단면평균온도의 최대 값이 약 8°C가량 상향조정되는 것이 적절한 것으로 판단된다. 또한, 최소단면평균온도에 대해서 -5°C인 반면 표 2의 결과에서 대전 및 서울은 재현기간에 따라 2°C~5°C 가량 낮은 약 -8°C에서 -10°C를 보이고 있다.

온도하중에 관련된 외국의 시방규정들에서 수직방향 온도분포를 2중 혹은 3중선형 및 비선형 온도분포로 규정하고 있다. 특히, 유럽(CEN)⁶⁾의 경우 선형 온도분포에 의한 선형온도차로 정하는 등 다양한 방법들이 제안되고 있다. 본 연구에선 설계 및 실무에서 편리하게 적용될 수 있는 유럽(CEN)의 경우와 같이 선형온도차로 정의하였다(식 (1) 및 (2) 참조). 100년 빈도의 경우, 수직선형온도차는 서울 지역이 가장 낮은 10.4°C를 그리고 대전 지역이 가장 높은 12.4°C의 변화 범위를 보이고 있다. 수평선형온도차의 경우 콘크리트의 열 전달에 대한 특성상 큰 차이를 보이지 않았다. 해석에서 고려한 교량 단면에 대해, 단순 지지된 경우 수직선형온도차 12.4°C는 열팽창계수를 10×10^{-6} 로 가정할 때 $34.2 \times 10^{-6}(1/m)$ 의 \sim 방향 곡률을 유발한다. 이 값은 도로교시방서에서 슬래브와 복부간의 온도차를 5°C로 고려한 경우 등가의 선형온도차 6.2°C 및 곡률 $17.1 \times 10^{-6}(1/m)$ 보다 두 배정도 큰 값이다. 연속교의 경우, 내부 지점 모멘트 $M = (\text{지점조건에 의한 계수}) \times (\text{수직선형온도차}) \times (\text{단면강성})$ 으로 표현되며, 결국 앞에서와 마찬가지로 두 배의 차이를 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 고속전철용 PSC 박스거더교량에 대하여 국내의 지역적 환경을 반영하고, 설계단계에서 반드시 고려하여야 하는 온도하중에 대한 규정을 제시하기 위해, 장기 온도해석 데이터의 통계적 방법을 통해 PSC 박스거더교의 설계온도하중을 추정하는 보다 합리적인 과정에 대해 기술하였다.

통계해석 결과, 설계온도하중의 경우 보통지방에서 단면평균온도의 승강 범위는 약 15°C가량 상향조정이 적절한 것으로 판단된다. 단면온도분포를 유럽(CEN)의 경우와 같이 선형온도차로 정의하는 경우, 100년 빈도인 온도하중의 수직선형온도차는 약 +12.4°C를 나타내고 있다. 이 온도차에 의해 유발되는 곡률 및 연속교의 경우 내부 지점 모멘트는, 도로교 시방서에서 규정하는 온도차에 의한 것보다 약 두 배 높은 값을 나타낸다.

참고문헌

- 1) 한국건설기술연구원, 고속전철 교량설계용 하중체계에 관한 연구, 1999.
- 2) Resnick, S.I., "Tail Equivalence and Its Applications", *Journal of Applied Probability*, Vol 8, pp. 135-156, 1971.
- 3) Kuester, J.L. and Mize, J.H., *Optimization Techniques with FORTRAN*, McGraw-Hill, New York., Chapter 10, 1973.
- 4) Castillo, M., *Extreme Value Theory in Engineering*, Academic Press Inc., Boston, 1988.
- 5) 건설교통부, 도로교 표준시방서, 1996.
- 6) EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION CEN. *Eurocode 1: Basis of design and actions on structures*, Thermal actions, CEN/TC250/SC1, Part 2.5, 1995.