

상대습도 및 온도에 대한 시간 단계 해석을 적용한 콘크리트 구조의 크리프계수 산정

김경현¹, 김기현², 백인열^{3*}

Calculation of Creep Coefficient for Concrete Structures Applying Time Step Analysis for Relative Humidity and Temperature

Kyunghyun Kim¹, Ki Hyun Kim², Inyeol Paik^{3*}

Abstract: As part of a study to analyze the excessive camber occurring in prestressed concrete railway bridges, this paper presents a calculation method and analysis results for the creep coefficient which defines the increase in camber of a concrete structure over time. Using the creep coefficient formula of the design code, the coefficient is obtained by applying the climatic conditions (relative humidity and temperature) of 12 regions in Korea. The effects of differences in climatic conditions by region and starting time of load on the creep coefficient are analyzed. In order to properly calculate the creep, most of which occurs in the early stages of loading, a detailed analysis is performed by applying a time step analysis method to consider varying climate conditions through loaded period. The creep coefficient obtained by applying the average climate conditions of the region is similar to the average of the creep coefficients obtained by time step analysis. Through time step analysis, it is shown that the offset and overlap effects of relative humidity and temperature on the creep coefficient and the climate effect at the time of initial loading can be appropriately represented.

Keywords: Creep coefficient, Camber, Concrete structure, Relative humidity, Temperature, Time-step analysis

1. 서 론

현재 국내 철도교량의 상부구조형식은 주로 콘크리트 거더로 구성되어 있으며, 콘크리트 재료의 특성상 하중이 지속적으로 작용되는 경우 시간이 지남에 따라 크리프가 발생된다. 특히 프리스트레스트 콘크리트(Prestressed concrete, 이하PSC) 구조를 설계하는 경우 짧은 시간 재하되는 열차 활하중을 포함하여 구조물에 작용되는 총 하중을 구하고, 이에 의하여 콘크리트에 발생하는 인장응력이 허용범위 이내에 들도록 큰 긴장력을 도입하게 되면, 재하기간이 길어질수록 크리프에 의한 영향으로 철도교량에 과대 솟음이 발생하게 된다. 이와 같은 과대 솟음이 발생하게 되면 차량의 탈선, 승객의 승차감 저하 등과 같은 문제를 발생시킬 수 있으므로, 미리 솟음 현상을 방지할 필요가 있다. 이 논문에서는 철도교량에 발생하는 과대 솟음 현상을 분석하기 위한 연구의 일환으로, 콘크리트 교량의 장기 변형에 큰 영향을 주는 크리프에 대한 상세해석

을 통한 연구 결과를 제시한다.

국내 콘크리트 구조기준의 설계식을 이용하여 콘크리트 교량의 크리프에 주로 영향을 주는 설계 변수인 상대습도와 온도를 대상으로 연구를 수행한다. 국내 콘크리트 구조 설계 코드인 KDS 14 20 01(MLIT, 2023) 및 콘크리트 교량 설계 코드인 KDS 24 14 21(MLIT, 2023)에서 적용하고 있는 크리프계수의 설계식은 CEB-FIP(1993)에서 규정하고 있는 식을 따르고 있으며, 이 식은 많은 연구자들의 연구에 의하여 개발되어왔다. Bazant and L'Hermite(1988)는 이전의 연구자들이 실내 실험으로 항온 및 항습의 조건 하에 수행한 장기거동 실험 결과 데이터를 활용하여 크리프 산정식과 확률분포를 연구하였다. Browne (1968)은 즉시 및 장기 변형에 대한 연구를 수행하였으며, 온도 변화를 변수로 하여 실험을 수행하였다. Hansen and Mattock (1966)은 시간, 부재의 크기와 형태 등을 변수로 하여 크리프와 건조수축의 상관관계에 대한 연구를 수행하였으며, 4년 동안 실험실 내에서 일정한 온도 70F, 상대습도 50%로 크리프와 건조수축에 대한 변형 측정 실험을 수행하였다. Wittmann et al. (1987)은 유수의 대학들에서 수행한 실험 결과를 적용하여 장기 변형에 대한 통계분석을 연구하였으며, 해당 연구 데이터들은 실험실에서 상대습도 65± 5%, 온도 18±1℃의 조건하에서 수행되었다. 이러한 연구 결과들을 기반으로 상대습도, 온도, 부재치수, 콘크리트 강도 등을 변수로 하여 시간에 대한 함수로

¹정회원, 가천대학교 박사과정

²정회원, 한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부 철도구조연구실 선임연구원

³정회원, 가천대학교 토목환경공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: piyeol@gachon.ac.kr

Gachon University, 1342, Seongnam-daero, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2023년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

나타내는 CEB-FIP의 크리프 설계식이 개발되었다.

일반적으로 설계 실무에서 크리프계수를 계산하는 경우에는 재하기간 내 동일한 상대습도와 온도를 적용하여 계산하고 있다. 그러나 실제 콘크리트 구조물은 양생 이후에 프리스트레스가 도입되고 지속하중이 재하되는 시점부터 구조물이 위치한 지역의 상대습도와 온도를 받게 된다. 이를 감안하여 콘크리트구조 설계기준 및 교량 설계기준에서는 지속 하중이 작용하는 동안 온도가 변화할 때 크리프계수를 보정하도록 규정하고 있다. 이 논문에서는 대상 지역의 실제 기후조건을 고려하여 크리프계수를 해석하기 위한 방법을 적용하여 크리프계수를 상세 해석한다.

이 논문에서는 콘크리트 철도교량의 재하기간에 따른 장기 변형에 크게 영향을 주는 크리프를 상세분석하기 위하여, 크리프에 영향을 주는 요인 중 상대습도와 온도를 대상으로 분석한다. 실제 구조물이 접하는 기후조건을 적용하기 위하여, 국내 철도주요노선상 지역의 과거 관측 자료를 활용하여 분석한다. 상대습도와 온도가 크리프에 주는 영향을 고려하여 설계기준의 온도에 대한 보정 식을 사용하며, 시간 단계 해석(Time-step Analysis, 이하 TSA) 방법을 적용하여 크리프 발생량이 상대적으로 많은 초기 재하시점의 기후조건을 구분하여 반영할 수 있도록 한다. 이를 통하여 설계 실무에서 상대습도와 온도를 하나의 상수 값으로 적용하는 경우의 결과와 이 연구에서 적용하는 TSA 방법에 의한 결과를 비교하여, 국내 기후에 따른 시기별 및 지역별 크리프 발생량에 대한 연구결과를 제시한다.

2. 크리프 산정식 및 국내 기후 적용

2.1 설계기준의 크리프 모델

콘크리트 철도교량의 쏘음 현상에 크게 영향을 주는 크리프

에 대한 분석을 수행하기 위하여, 국내 교량설계기준의 콘크리트 교량 코드 및 콘크리트 구조 코드에서 동일하게 규정하고 있는 크리프 모델을 분석한다. 콘크리트 교량의 전체 변형을 $\varepsilon_{cr}(t, t')$ 은 시간 t' 에서 작용응력 $f_c(t')$ 에 의한 콘크리트의 순간 변형과 크리프 변형의 합으로 식 (1)과 같이 결정된다. 여기서 크리프 변형은 콘크리트의 압축강도, 부재의 크기, 평균 상대습도, 온도 변화, 재하할 때의 재령, 재하 기간, 시멘트 종류, 양생온도와 작용응력의 크기 등의 변수에 영향을 받는다. 이 연구에서는 지속하중이 작용하는 동안 상대습도와 온도의 변화를 고려한 크리프계수를 산정하며, 그 이외의 변수는 설계식의 조건과 동일하다고 가정하여 보정하지 않는다.

$$\varepsilon_{cr}(t, t') = f_c(t') \left[\frac{1}{E_{ci}(t')} + \frac{\varphi(t, t')}{E_{ci}} \right] \quad (1)$$

여기서 t 는 크리프를 계산하는 시점, t' 은 외력 하중이 재하되는 시점, 즉 크리프가 발생하기 시작하는 시점이며, $\varphi(t, t')$ 는 크리프계수, E_{ci} 는 초기접선 탄성계수를 의미한다. 식 (1)에서 크리프계수 $\varphi(t, t')$ 는 CEB-FIP에서 규정하는 크리프 식과 동일하며 Table 1에 정리하여 나타내었다. 여기서 h 는 콘크리트 단면적의 둘레 중에서 수분이 외기로 확산되는 둘레길이를 고려한 개념부재치수, f_{cm} 은 콘크리트의 평균압축강도를 지칭한다. 지속하중이 작용하는 동안 온도 (Temperature, 이하 T)가 20°C인 경우에서는 Table 1의 좌측 수식을 적용한 상대습도(Relative humidity, 이하 RH)에 대한 함수로 크리프계수를 산정할 수 있다. 지속하중이 작용하는 동안 온도가 20°C가 아닌 경우에는 Table 1의 우측에 정리된 식을 적용하여 온도에 대한 보정을 계산해야 한다. 실제 교량에 지속하중이 작용하는 동안 교량이 접하게 되는 상대습도와 온도는 일정하게 유

Table 1 Formula to determine creep coefficient $\varphi(t, t')$

Basic formula		Modification for temperature	
$\varphi(t, t') = \varphi_0 \beta_c(t-t')$		$\varphi(t, t') = \varphi_{0,T} \beta_{c,T}(t-t') + 0.0004(T-20)^2$	
φ_0	$\varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t')$	$\varphi_{0,T}$	$\varphi_{RH,T} \beta(f_{cm}) \beta(t')$
φ_{RH}	$1 + \frac{1-0.01RH}{0.10 \times \sqrt[3]{h}}$	$\varphi_{RH,T}$	$\varphi_T + (\varphi_{RH} - 1.0) \varphi_T^{1.2}$
	-	φ_T	$\exp[0.015(T-20)]$
$\beta(f_{cm})$	$16.8 / \sqrt{f_{cm}}$	$\beta(f_{cm})$	$16.8 / \sqrt{f_{cm}}$
$\beta(t')$	$1 / (0.1 + (t')^{0.2})$	$\beta(t')$	$1 / (0.1 + (t')^{0.2})$
$\beta_c(t-t')$	$\left[\frac{(t-t')}{\beta_{RH} + (t-t')} \right]^{0.3}$	$\beta_{c,T}(t-t')$	$\left[\frac{(t-t')}{\beta_{RH,T} + (t-t')} \right]^{0.3}$
β_{RH}	$1.5 [1 + (0.012RH)^{18}] h + 250 \leq 1,500 \text{days}$	$\beta_{RH,T}$	$\exp \left[\frac{1,500}{273 + T} - 5.12 \right] \beta_{RH}$

지하지 않기 때문에, 지속적으로 변화되는 상대습도 및 온도를 고려한 크리프의 상세 해석을 수행할 필요가 있다.

교량을 설계하는 시점에서는 설계 이후 시공 및 재하 기간에 발생할 기후조건을 미리 예측하기에 어려우므로, 설계 기준 해설(KIBSE, 2015; KCI, 2021)에서 제시하고 있는 일반적인 기후조건인 상대습도 70%, 온도 20°C가 일정하게 유지되고 있는 조건으로 크리프를 산정하고 있다. 이와 같이 교량의 설계에서는 국내 실제 상대습도와 온도 변화를 고려한 해석이 불가능하여 설계 기후조건을 적용하여 크리프계수를 산정하는 경우, 설계와 달리 실제 크리프계수가 크게 발생되는 조건에서 시공하게 되면 과대 수축 현상이 발생하게 된다. 콘크리트 교량의 시공 이후에 발생하는 과대 수축 현상을 요인별로 분석하기 위하여, 크리프 설계 계산하는 경우의 가정한 기후조건과 이후 실제 발생한 기후조건의 차이에 대하여 상세 분석할 필요가 있다. 이 논문에서는 상대습도와 온도가 변화되는 경우를 철도 주요노선 상 지역을 대상으로 상대습도와 온도의 관측 자료를 활용하여 크리프를 상세 분석한다.

2.2 국내 상대습도 및 온도 데이터

상대습도와 온도가 변화되는 경우를 고려한 콘크리트 교량



Photo 1 12 example regions on railway lines selected for calculation of creep coefficient

에 발생하는 크리프를 상세해석하기 위하여, 국내 철도노선상 주요 지역을 선정하여 지역별 상대습도와 온도 데이터를 수집하였다. Photo 1과 같이 대구(Daegu, DAE), 강릉(Gangneung, GAN), 서울(Seoul, SEL), 부산(Busan, BUS), 포항(Pohang, POH), 원주(Wonju, WJU), 전주(Jeonju, JNJ), 대전(Daejeon, DAJ), 진주(Jinju, JIN), 광주(Gwangju, GWJ), 안동(Andong, ADG), 천안(Cheonan, CAN)로 총 12개 지역을 선정하여, 기상청 웹사이트(KMA, 2023)에서 2003년도부터 2022년도까지 20개년도 자료를 수집하였다. 기상청에서 제공하는 상대습도와 온도 데이터는 일별 평균값(Daily average value)으로, 이 값을 활용하여 크리프에 대한 분석을 수행한다.

Table 2에는 20개년도 상대습도와 온도에 대한 지역별 평균값, 전체지역의 평균값을 계산하여 나타내었으며, 지역 순서는 3.3절의 Fig. 7에서 최종적으로 산정되는 평균 크리프계수의 지역별 결과에 대한 내림차순으로 나열하였다. 또한 콘크리트구조기준 해설(KCI, 2021)에서 제시한 일반적인 기후조건에 대하여 적용하는 값인 상대습도 70%와 온도 20°C로, 이 논문에서는 설계 실무(Design practice) 값으로 나타내었다. Table 2에서 지역별 평균 상대습도는 강릉이 58.3%로 가장 낮고, 천안이 69.6%로 가장 높으며, 평균 온도는 천안이 12.2°C로 가장 낮고, 부산이 15.1°C로 가장 높게 산정되었다. 또한 12개 지역의 평균 상대습도는 64.5%, 평균 온도는 13.6°C이며, 현재 국내 설계에서 사용하는 값보다 작다. 이 연구에서는 실제 국내 기후조건에 따른 상대습도와 온도의 평균값을 고려하여 설계 실무에서 사용하는 값보다 감소된 값을

Table 2 Average of relative humidity and temperature calculated from daily average values for last 20 years from 2003 to 2022

Regions	Relative humidity (%)	Temperature (°C)
DAE	59.1	14.6
GAN	58.3	13.7
SEL	60.9	13.0
BUS	62.4	15.1
POH	63.3	14.8
WJU	63.9	12.4
JNJ	68.0	13.9
DAJ	67.6	13.4
JIN	67.4	13.6
GWJ	68.4	14.4
ADG	65.8	12.5
CAN	69.6	12.2
Mean	64.5	13.6
Design practice	70.0	20.0
Proposed	65.0	15.0

제시(Proposed)하고, 이를 분석내용 중 한가지로 고려한다.

Fig. 1에는 국내 상대습도와 온도가 1년 동안 변동하는 모습을 나타내었다. Table 2의 처음 2개 지역과 마지막 2개 지역에 대한 월별 평균값이 변동하는 모습을 전체 12개 지역의 평균값(Total mean) 및 설계 실무 값과 비교하여 나타내었다. 전체 지역 평균값과 비교하여, 상대습도는 7월에 최댓값으로 하절기인 6월부터 10월까지 크고, 온도는 8월에 최댓값으로 하절기인 5월부터 10월까지 크다. 이로부터 국내 기후 조건의 특성은 상대습도가 높은 계절에는 온도도 높고, 상대습도가 낮은 계절에는 온도도 낮음을 확인할 수 있다.

서로 다른 지역별 기후조건에 따른 크리프 차이를 분석하기 위하여, 지역별 상대습도와 온도의 평균값을 적용하여 산정한 크리프 계수를 비교하였다. Table 3에는 상대습도와 온

도에 대하여 각 지역별 평균값, 설계 실무 값으로 산정한 재하 기간에 따른 크리프계수를 나타내었다. 이 논문에서 설계변수의 값은 실제 철도교인 25m 경간의 PSC 빔 교량 설계에 적용된 값으로, $h=239\text{mm}$, $f_{cm}=44\text{MPa}$, $t'=28$ 일로 적용하였다. 크리프계수는 전체지역의 평균 상대습도인 64.5%와 평균 온도인 13.6°C를 기준으로 상대습도가 59.1%로 낮고 온도가 14.6°C로 높은 대구가 가장 크고, 상대습도가 69.6%로 높고, 온도가 12.2°C로 낮은 천안이 가장 작다. 또한 전체지역의 평균값에 비하여 대체로 상대습도가 낮거나, 온도가 높은 지역은 크리프계수가 크고, 상대습도가 높거나, 온도가 낮은 지역은 크리프계수가 작게 산정된다. 즉, 지역별 평균 상대습도와 평균 온도에 대한 크리프계수는 상대습도가 높을수록, 온도가 낮을수록 크게 산정된다.

Fig. 2에는 재하기간에 따른 크리프 변화를 분석하기 위하여, 크리프계수가 가장 큰 대구 지역과 가장 작은 천안 지역을 대상으로 산정된 크리프계수를 그래프로 나타내었다. 재하 기간에 따른 크리프의 변화량은 초기 2년까지 급격하게 증가하지만, 그 이후에는 증가량은 작아지게 된다. 이를 Table 3에 나타낸 지역 평균값으로 확인하면, 크리프 발생 90일 시점의 크리프계수와 2년 시점의 크리프계수는 최종 20년에 발생한 크리프량의 54.3%와 84.4%이므로, 재하 초기의 상대습도 및 온도 조건은 최종 크리프량에 매우 큰 영향을 준다. 따라서 이 논문의 3장에서는 재하초기의 상대습도와 온도 영향을 구분

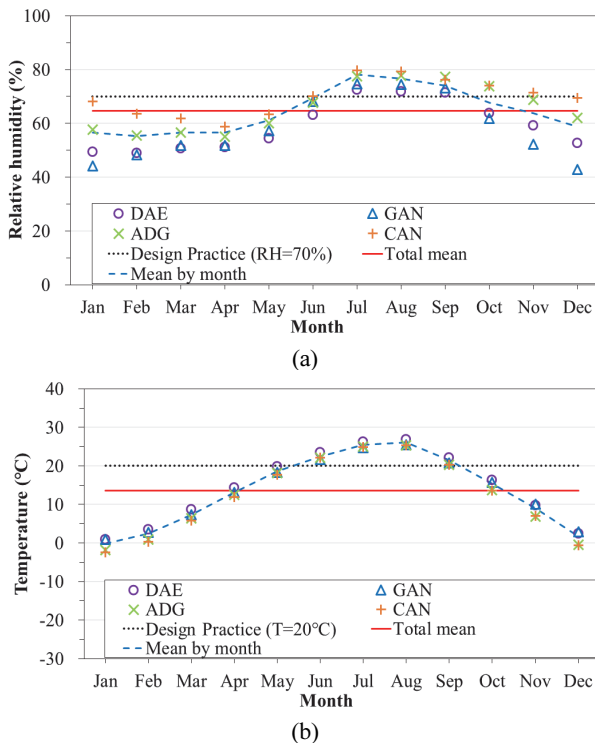


Fig. 1 Monthly distribution of regional mean compared with constant value used in design practice : (a) Relative humidity; (b) Temperature

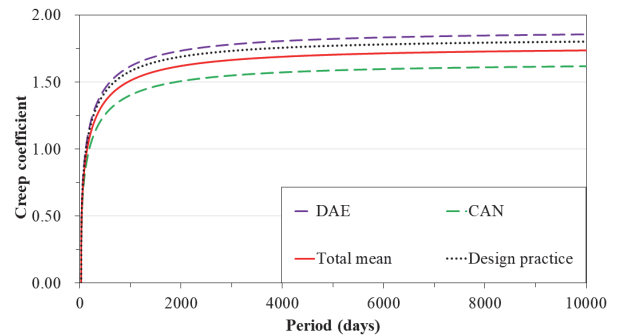


Fig. 2 Creep coefficients using regional average values and constant values used in design practice for RH and T

Table 3 Creep coefficients calculated from regional average values for RH and T compared with those calculated from constant values used in design practice

Period	Region												Mean	Design Practice
	DAE	GAN	SEL	BUS	POH	WJU	JNJ	DAJ	JIN	GWJ	ADG	CAN		
90 days	1.003	0.996	0.962	0.977	0.965	0.925	0.905	0.902	0.907	0.908	0.909	0.867	0.936	0.986
2 years	1.558	1.548	1.494	1.517	1.500	1.438	1.408	1.404	1.411	1.413	1.412	1.350	1.455	1.525
10 years	1.800	1.790	1.729	1.751	1.732	1.666	1.629	1.625	1.633	1.634	1.636	1.566	1.684	1.750
20 years	1.843	1.834	1.772	1.794	1.774	1.708	1.670	1.666	1.674	1.674	1.677	1.606	1.724	1.791

하여 반영할 수 있도록, 시간 단계 해석방법을 통한 크리프 해석을 수행한다.

2.3 상대습도 및 온도에 의한 크리프 상쇄효과 및 중첩효과

크리프계수가 가장 크게 산정된 대구지역을 대상으로 상대습도와 온도가 크리프에 주는 효과를 분석한다. Fig. 3에는 2013년도부터 2022년도까지 상대습도와 온도에 대한 대구 지역의 월평균값을 적용하여 한 달 기간 동안 발생할 크리프 계수를 산정하여 해당 달에 나타내었다. Fig. 3의 하단 막대 그래프는 크리프에 미치는 상대습도에 의한 효과와 온도에 의한 효과를 분리하여 비교하였다. 여기서 상대습도와 온도에 의한 효과는 다음과 같이 가정하였다. Table 2의 대구지역 상대습도와 온도의 평균값을 Table 1 수식에 적용하여 계산한 크리프를 기준으로, 상대습도 만에 의한 효과의 경우 온도는 지역 평균값, 상대습도는 각 월평균값을 적용한 크리프와의 차이로 가정하고, 온도 만에 의한 효과의 경우 상대습도는 지역 평균값, 온도는 각 월평균값을 적용한 크리프와의 차이로 가정한다.

Fig. 3의 하단 막대그래프를 보면, 온도에 의한 크리프 효과의 경우 대체로 온도가 높은 하절기에 최대로 산정되며, 상대습도에 의한 크리프 효과의 경우는 상대습도가 낮은 동절기에 최대로 산정된다. 반면 Fig. 3의 상단 실선 그래프를 보면 대구지역의 월평균 상대습도와 온도를 적용하여 산정한 크리프계수의 최댓값은 대체적으로 4, 5월경에 많이 발생한다. 2014년 5월경과 같이 온도에 의한 크리프 효과와 상대습도에 의한 크리프 효과는 각각 0.099, 0.106으로 중간적으로 크지만 서로 중첩(Overlapping)되어 크리프계수는 커지게 된다.

주로 7, 8월경에는 상대습도와 온도가 모두 높아, 상대습도에 의한 크리프 효과는 작아지고, 온도에 의한 크리프 효과는 커지므로, 2015년도 8월경과 같이 상대습도와 온도에 의한

크리프 효과가 각각 -0.126, 0.202로 서로 상쇄(Offset)되어 평균값에 근접하게 된다. 경우에 따라서는 2013년 7, 8월경과 같이 온도에 의한 크리프 증가 효과는 0.281로 매우 크지만, 상대습도에 의한 크리프 감소 효과가 -0.073로 상쇄효과가 작아, 온도가 지배적으로 작용하게 되어 크리프계수가 연 최댓값에 근접한다. 이와 반대로 2022년 8, 9월경과 같이 상대습도에 의한 크리프 감소 효과는 -0.202로 매우 크지만, 온도에 의한 크리프 증가 효과가 0.127로 상쇄효과가 작아, 상대습도가 지배적으로 작용하게 되어 크리프계수가 연 최솟값에 근접한다.

이 분석 결과로 설계 실무 값인 상대습도 70%와 온도 20°C에 비하여 실제 전체지역 평균값인 상대습도 64.5%와 온도 13.6°C는 상대습도와 온도 모두 작다. 그러므로 상대습도와 온도에 의한 크리프 효과가 서로 상쇄되어, 결과적으로는 실제 평균값을 적용하여도 기존 설계 실무 값과 비슷한 결과를 얻을 수 있게 된다.

3. 시간 단계 해석방법을 통한 크리프 산정

3.1 시간 단계 해석방법

재하초기의 기후조건에 따른 크리프 변화를 분석하기 위하여, 선정 지역의 일일 상대습도 및 온도 값을 적용하여 시간 단계 해석(Time-step analysis, 이하 TSA) 방법으로 크리프를 분석한다. TSA 방법에서는 시간 t' 에서 하중이 재하된 후 임의의 시간 τ 일 때의 크리프계수 $\varphi_{TSA}(\tau, t')$ 는 식 (2)와 같이 시간 $\tau - \Delta\tau$ 까지 구한 크리프계수에 단위시간 $\Delta\tau$ 이 지나면서 발생하는 크리프계수의 증가량 $\Delta\varphi(\tau, t')$ 을 누적하여 산정한다. 여기에서 현재시간 단계에서의 해당 상대 습도 RH 와 온도 T 에 의한 크리프계수의 함수를 $\varphi_{\tau}(t, t')$ 라 할 때, 크리프계수의 증가량 $\Delta\varphi(\tau, t')$ 을 식 (3)과 같이 시간 증분 $\Delta\tau$ 동

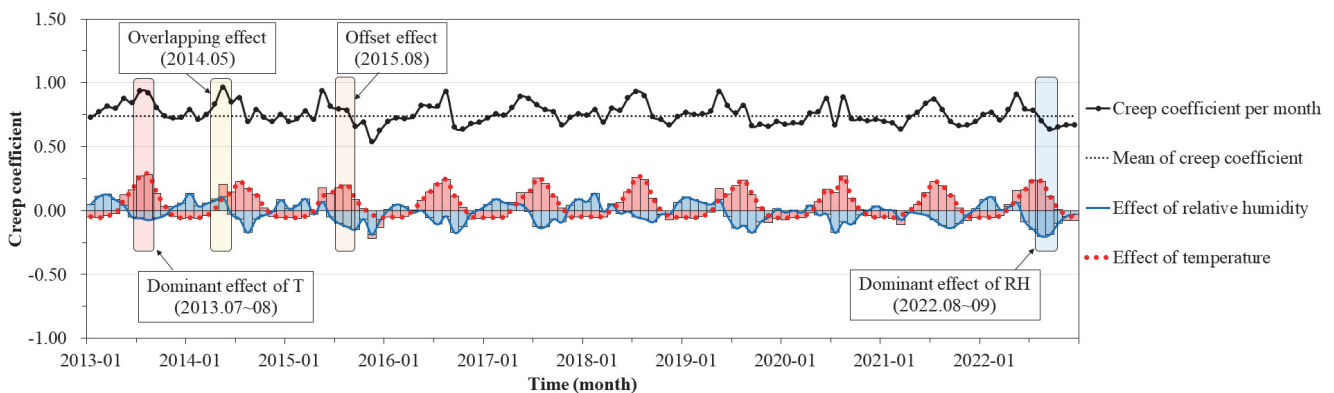


Fig. 3 Effect of relative humidity and temperature on creep coefficient calculated for 1 month of loaded time using monthly average RH and T for Daegu

안 $\varphi_r(t, t')$ 함수의 증가량으로 나타낸다. 이와 같은 과정을 반복하여 크리프 산정 시점 t 까지 발생하는 크리프계수 $\varphi_{TSA}(t, t')$ 을 식 (4)와 같이 산정한다. 이와 같은 방법은 Fig. 4에 도시하여 나타내었으며, 이 논문에서 단위 시간 $\Delta\tau$ 는 1일로 계산하였다.

$$\varphi_{TSA}(\tau, t') = \varphi_{TSA}(\tau - \Delta\tau, t') + \Delta\varphi(\tau, t') \quad (2)$$

$$\Delta\varphi(\tau, t') = \varphi_r(\tau, t') - \varphi_r(\tau - \Delta\tau, t') \quad (3)$$

$$\varphi_{TSA}(t, t') = \sum_{\tau=t'+\Delta\tau}^t \Delta\varphi(\tau, t') \quad (4)$$

천안지역을 대상으로 TSA 방법을 적용하여 산정한 크리프계수를 상대습도와 온도를 상수로 두고 구한 크리프계수와 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. TSA 방법은 2003년 1월 1일부터 2012년 12월 31일까지 상대습도와 온도를 적용하여 1일 간격으로 이동하면서 각각 10년(3,650일) 기간에 대하여 산정한 크리프계수 중 최댓값, 최솟값, 평균값을 나타내었다. 또한 천안지역의 평균 상대습도와 평균 온도를 10년 동안 상수로 두고 구한 크리프계수와 설계 실무 값인 상대습도 70%와 온도 20°C를 10년 동안 상수로 두고 구한 크리프계수도 비교하여 나타내었다. TSA 방법을 통하여 크리프 발생 시점으로부터 10년 지난 시점의 크리프 계수의 평균값 1.618은 해당 지역

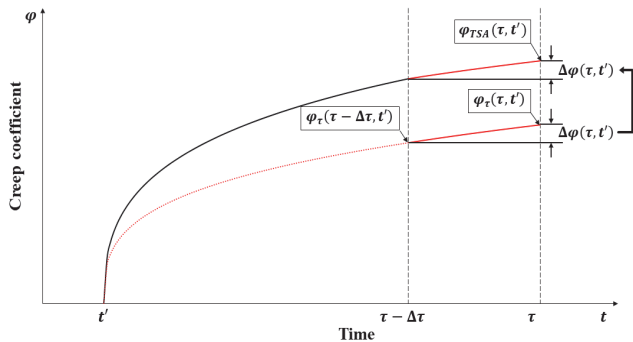


Fig. 4 Time-step analysis method

의 평균 상대습도와 평균 온도를 적용하여 산정된 크리프계수 1.566과 비교하여 3.2%로 작은 차이가 산정되었다. 또한 TSA 방법으로 산정된 크리프계수의 최댓값은 1.876으로 설계에서 적용하는 상대습도와 온도로 구한 크리프계수인 1.750보다 더 큰 값을 가지므로, 재하초기의 기후조건을 고려할 때는 경우에 따라 실제 크리프가 설계에서 산정한 크리프보다도 클 수 있음을 보인다.

Table 4에는 12개 지역에 대한 TSA 방법과 지역의 평균 상대습도와 평균 온도를 적용하여, 크리프 발생시점으로부터 90일과 10년 크리프계수 결과를 나타내었다. TSA 방법을 적용하여 산정된 크리프계수의 평균값은 지역의 평균 상대 습도와 평균 온도를 적용하여 산정된 크리프계수와 비교 하면, 크리프 발생시점으로부터 90일에 대한 크리프계수 차이는 1.6%, 10년에 대한 크리프계수 차이는 1.8%로 매우 비슷하다. 따라서 TSA 방법으로 산정한 크리프계수의 평균값은 지역의 평균 상대습도와 평균 온도를 적용하여 산정한 크리프계수와 차이가 작지만, 전주지역에서 발생된 10년 크리프계수에 대하여 최대 4.2%의 차이를 가지는 등 지역 및 크리프 발생 시점의 기후조건에 따른 차이가 있다. 그러므로 지속적으로 변화되는 기후조건을 고려한 크리프를 분석하기 위하여 TSA 방법을 적용한 상세해석이 필요하며, 이 논문에서는 TSA 방법을 적용하여 재하초기, 즉 크리프 발생시점에서의 기후조건이 크리프에 미치는 효과를 상세 해석한다.

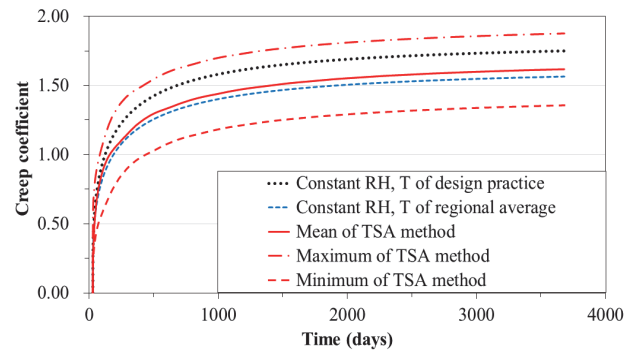


Fig. 5 Creep coefficient by applying TSA method and constant RH and T

Table 4 Creep coefficient according to period by locations with TSA method

Period	DAE	GAN	SEL	BUS	POH	WJU	JNJ	DAJ	JIN	GWJ	ADG	CAN	Mean	Design practice
90 days	Average RH, T	1.003	0.996	0.962	0.977	0.965	0.925	0.905	0.902	0.907	0.908	0.909	0.867	0.936
	TSA Method	1.027	1.006	0.998	0.966	0.959	0.964	0.925	0.923	0.911	0.917	0.927	0.893	0.951
	Ratio (%)	97.7	99.0	96.4	101.1	100.6	96.0	97.8	97.7	99.6	99.0	98.1	97.1	98.4
10 years	Average RH, T	1.800	1.790	1.729	1.751	1.732	1.666	1.629	1.625	1.633	1.634	1.636	1.566	1.683
	TSA Method	1.866	1.785	1.764	1.766	1.725	1.691	1.700	1.684	1.655	1.679	1.634	1.618	1.714
	Ratio (%)	96.5	100.3	98.0	99.2	100.4	98.5	95.8	96.5	98.7	97.3	100.1	96.8	98.2

3.2 초기 재하기간에 따른 최대 크리프

크리프 발생 초기시점의 기후조건에 따른 크리프 변화를 분석하기 위하여, TSA 방법을 통한 지역 및 크리프 발생시점의 기후조건을 고려하여 10년 기간 동안 발생하는 크리프 계수를 산정하였다. 2003년도부터 2022년도까지의 20년 자료 중에서 크리프계수는 2003년 1월 1일부터 2012년 12월 31일까지 일평균 상대습도와 온도를 적용하여 1일 간격으로 이동하면서 각각 크리프 발생 후 10년 기간에 대한 크리프 계수를 계산하였다. 이 결과로부터 각 지역의 최대 월평균 크리프계수를 산정하여 Fig. 6에 나타내었으며, 여기서 최대 월평균 크리프계수는 크리프 발생 시작시점이 동일한 월에서의 각 시점으로부터 10년 이후에 발생하는 연도별 최대 크리프계수들의 월평균값이다.

Fig. 6에는 지역의 월별 크리프 변화 경향을 보기 위하여, 12개 지역 중 크리프 상위 2개 지역인 대구와 강릉, 하위 2개 지역인 안동과 천안을 대상으로 산정된 최대 월평균 크리프계수와 12개 지역에 대하여 산정된 최대 월평균 크리프계수, 설계 실무 값으로 산정한 크리프계수를 나타내었다. 12개 지역의 최대 월평균 크리프계수는 5월에 1.879로 최댓값이 산정되었으며, 11월에 1.705로 최솟값이 산정되었다. Fig. 3에서 확인하면 5월의 지역별 평균 상대습도가 61.3%로 전체기간 평균 상대습도인 64.5%에 비하여 95.0%로 작고, 지역별 평균 온도가 18.5°C로 전체기간 평균 온도인 13.6°C에 비하여 136.0%로 크다. 또한 11월은 지역별 평균 상대습도가 63.7%로 전체기간 평균 상대습도에 비하여 98.8%로 비슷하지만, 지역별 평균 온도가 11.0°C로 전제년도 평균 온도보다 80.9%로 매우 작다. 2.3절에서 분석한 중첩효과에 따라 상대습도가 낮을수록, 온도가 높을수록 크리프는 증가하는 경향이 있으므로, 초기 크리프 발생시점이 5월인 경우 크리프가 가장 크게 발생되고, 11월인 경우 크리프가 가장 작게 발생된다.

따라서 초기 재하시점에 따라서 각 지역에서 발생하는 크리프는 설계 크리프보다 크게 발생될 수 있으며, 특히 대구와 강릉과 같이 평균 상대습도가 낮고, 평균 온도가 높은 지역에

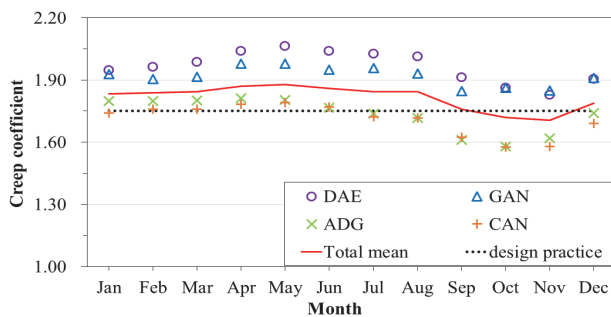


Fig. 6 Mean of monthly maximum creep coefficients according to starting month of creep with TSA method

서는 크리프가 매우 크게 발생될 수 있다. 크리프는 발생 초기 시점의 기후조건에 따라 영향을 많이 받아 크리프가 크게 발생하는 조건에서 교량을 시공하게 되는 경우, 설계에서 계산된 값보다 큰 크리프가 발생되어 교량에서 과도한 솟음이 발생할 수 있다. 그러므로 교량의 설계에서도 과도하게 발생하는 솟음을 제어하기 위하여, 해당 지역의 기후조건을 고려한 크리프의 상세해석이 필요하다.

3.3 상대습도와 온도 제한

Fig. 7에는 2003년 초부터 2012년 말까지 1일 간격으로 크리프 발생 초기시점을 이동하면서 10년 이후에 발생하는 지역별 크리프계수를 TSA 방법으로 상세 해석한 결과로부터, 지역별 발생하는 크리프계수의 최댓값, 최솟값, 평균값을 산정하여 나타내었다. 이를 상대습도와 온도에 대하여 지역별 평균값, 설계 실무 값, 제안 값을 각 적용한 경우 크리프계수와 비교하였다. TSA 방법을 적용하여 산정한 크리프 계수는 대구지역에서 최대(Maximum creep coefficient) 2.168, 안동지역에서 최소(Minimum creep coefficient) 1.324의 값이 산정되었으며, 이 값들은 설계 실무값을 적용한 크리프계수인 1.750과 비교하여 최댓값의 경우 23.9%, 최솟값의 경우 24.4%의 차이를 가진다. 그러므로 크리프 발생 초기 시점 및 지역의 차이에 따라 설계 크리프 계수보다 매우 크게 증가하거나 감소될 수 있으므로, 설계와 시공에서 크리프를 상세 해석할 필요가 있다.

이미 공용중인 교량에 대한 유지관리 시점에서 발생하는 솟음을 보다 상세하게 해석할 필요가 있는 경우에는, 해당 지역의 시공 이후 현재까지의 과거 기상청 자료를 이용하여 TSA 방법을 적용하여 분석할 수 있다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 TSA 방법으로 해석한 크리프계수의 지역별 평균값은 설계 실무 값을 적용한 크리프계수에 비하여, 지역의 평균 상대습도와 평균 온도를 적용하여 산정한 경우의 크리프계수와 보다 근사함을 알 수 있다. TSA 방법으로 산정한 값을 기준으로 최대 차이를 예를 들면, 설계 실무 값을 적용한 경우에 천안

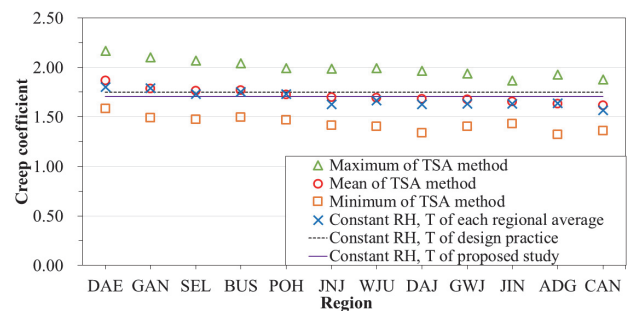


Fig. 7 Maximum, minimum and average creep coefficients by locations with TSA method

지역에서 8.1%가 발생하는 반면에, 지역의 평균 상대 습도와 평균 온도를 적용하여 산정한 경우에 전주지역에서 4.2%로 발생한다. 따라서 대상 지역의 평균 상대습도와 평균 온도 자료가 있는 경우에는 이를 적용하면 일반적으로 설계 실무 값을 적용한 크리프계수보다 실제에 근접한 해석을 할 수 있다. 만일 대상 지역의 기상 관측 자료가 없는 경우에는 Table 2에서 제시한 국내 평균 기후조건에 근접한 값인 상대습도 65%와 온도 15°C를 적용하여 크리프계수를 산정하면, TSA 방법으로 해석한 전체지역의 크리프계수 평균값과 0.4%의 차이로 매우 비슷한 결과를 보인다.

4. 결론

국내 콘크리트 거더로 공용중인 철도교량에서 과대 수축 문제가 다수 발생되고 있음에 따라, 과대 수축이 발생하는 원인에 대한 상세분석이 필요하다. 이 논문에서는 장기거동인 크리프에 대한 TSA 방법을 적용하여 국내 철도노선 상 주요 12개 지역의 실제 기후조건을 고려한 상세 해석한 연구 결과를 제시하였으며, 주요 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 국내 크리프 설계식에 따라 크리프계수를 산정하면 크리프 발생초기 90일 시점과 2년 시점의 크리프계수의 평균값은 20년에 발생한 크리프량의 54.3%와 84.4%에 달하므로, 재하가 시작되는 재하 초기의 상대습도 및 온도 조건은 최종 크리프량에 매우 큰 영향을 미친다.
- 2) 크리프계수는 상대습도가 낮을수록, 온도는 높을수록 증가하는 특성이 있으며, 국내 기후조건은 시기별로 상대 습도와 온도는 같이 낮아지거나 높아지는 경향이 있다. 이러한 특성으로 하절기에는 상대습도와 온도가 모두 높아 상대습도에 의한 크리프효과는 감소, 온도에 의한 크리프효과는 증가하여 서로 상쇄된다. 반면 4, 5월 경에는 비교적 상대습도는 낮고, 온도는 높아 상대습도와 온도에 의한 크리프효과가 모두 증가하여 서로 중첩된다. 따라서 크리프 발생 초기시점의 기후조건에 따라 상대습도와 온도에 의한 효과로 서로 중첩되어 크리프 변화량이 증가하거나, 서로 상쇄되어 크리프 변화량이 감소된다.
- 3) TSA 해석 방법을 적용하여 크리프 발생 초기시점에 따른 해석 결과, 비교적 상대습도가 낮고 온도가 높은 5월 경에 최대 크리프가 발생되며, 비교적 상대습도가 높고 온도가 낮은 11월경에 최소 크리프가 발생된다. 따라서 초기 크리프 발생시점의 기후조건에 따라 장기 크리프 계수가 크게 영향을 받으며, 교량 시공 시 크리프 감소를 참고할 수 있다.
- 4) TSA 해석 방법을 적용한 크리프계수의 평균값은 지역

의 평균 상대습도와 온도를 적용한 크리프 계수와 비교하여, 최대 4.2%, 평균적으로 1.8%의 차이를 보인다. 이는 설계 실무값을 적용한 크리프계수와 비교한 최대 8.1%, 평균적으로 2.3%의 차이보다 작으므로, TSA 방법을 대체하여 지역의 평균 기후조건을 고려한 크리프 계수를 상세 해석하면 실제 발생하는 크리프계수와 근접한 크리프를 산정할 수 있다. 또한 대상 지역의 관측 자료가 없는 경우에는 국내 철도 주요노선상 지역의 평균 기후조건을 고려한 값인 상대습도 65%와 온도 15°C로 적용하면 실제 기후조건을 고려한 크리프계수를 얻을 수 있다.

이 연구에서는 지속하중이 작용하는 동안 발생하는 크리프 수축에 영향을 주는 상대습도와 온도 효과를 분석하였으며, 향후 연구에서는 이와 같은 해석 결과를 검증할 수 있도록 실제 계측 자료가 매우 필요하다.

이 논문의 연구결과를 기반으로 향후 PSC 철도교량의 과대 수축 제어를 위한 크리프의 확률분포를 통계분석하여, 과대 수축에 대한 상세해석 연구의 기반이 될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 기본사업(PK2303A1)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT). (2023), Bridge Design Code : 24 14 21, Korea Construction Standards Center, Korea.
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT). (2023), Bridge Design Code : 14 20 01, Korea Construction Standards Center, Korea.
3. Comité Euro-international du Béton-Fédération internationale de la précontrainte (CEB-FIP). (1993), CEB-FIP Model Code 1990: Design code. Telford Ltd., London, UK.
4. Bazant, Z. P., and L'Hermite, R. (1988), Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete, Communications in Applied numerical Methods, USA, 98-215.
5. Browne, R. D. (1968), 13 Properties of concrete in reactor vessels, In Prestressed concrete pressure vessels, Thomas Telford Publishing, The Institution of Civil Engineers, New Zealand, 131-151.
6. Hansen, T. C., and Mattock, A. H. (1966), Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete, In Journal Proceedings, ACI, 63(2), 267-290.

7. Wittmann, F. H., Bažant, Z. P., Alou, F., and Kim, J. K. (1987), Statistics of shrinkage test data, ASTM International, *Cement, Concrete & Aggregates*, 9(2), 129-153.
8. Korea Meteorological Administration (KMA). (2023), Available at: <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>
9. Korea Concrete Institute (KCI). (2021), Concrete Structural Code and Commentary (in Korean).

Received : 09/18/2023

Revised : 09/27/2023

Accepted : 10/04/2023

요 지 : 프리스트레스트 콘크리트 철도 교량에서 발생하는 과도한 수축 문제를 분석하는 연구의 일환으로, 이 논문에서는 콘크리트 구조물의 시간에 따른 수축 증가량을 나타내는 크리프 계수에 대하여 산정 방법과 분석 결과를 제시한다. 설계기준의 크리프 계수 산정식을 사용하여 국내 12개 지역의 기후 조건(상대습도와 온도)을 적용한 크리프 계수를 구하고, 기후 조건에 대한 지역별 및 재하 시기별 차이가 크리프 계수에 미치는 영향을 분석한다. 재하 초기에 많이 발생하는 크리프를 적절하게 산정하기 위하여 시기별 기후조건을 구분하여 고려하도록 시간 단계 해석 방법을 적용하여 상세 분석한다. 지역의 평균 기후조건을 적용하여 구한 크리프 계수는 시간 단계 해석으로 구한 크리프 계수의 평균과 비슷하며, 시간 단계 해석을 통하여 크리프 계수에 미치는 상대습도와 온도의 상세, 중첩 효과 및 재하 초기 기후 효과를 적절하게 나타낼 수 있음을 보인다.

핵심용어 : 크리프계수, 수축, 콘크리트 구조, 상대습도, 온도, 시간 단계 해석
