

계절변화에 따른 PSC 균형 켄틸레버 교량의 장기거동 특성

Long-term Behavior of FCM Bridges considering Seasonal Temperature Variation – Part 1

이 선 호* / 이 학 은**

Lee, Son Ho / Lee, Hak Eun

Abstract

The objective of this study is to derive a shrinkage correction formula that considers temperature effect and to develop a methodology for the improved prediction of the long-term behavior of the FCM bridges by considering seasonal temperature variations in-situ. Thereby, current formulation were performed by using the actual experimental shrinkage data including seasonal temperature variation. The investigation of the long-term behavior of the FCM bridge was performed on the construction site in order to decide applicability of the shrinkage formula. Numerical results by the general method indicates inaccurate values of total strain when considering real strain, whereas the applied method demonstrates a good agreement in the resultant strain. In consequently, the applied method will improve the prediction of the long-term deformation of the FCM Bridges

Keywords : Flooding factors, urbanization, GIS, Transformation of information

요 지

본 연구에서는 계절에 따른 온도 변화를 고려한 건조수축의 예측모델을 제시하여, 실제구조물에서의 계절에 따른 온도변화에 대한 장기 거동 특성을 보다 향상된 방법으로 파악할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 연구에서 사용된 건조수축 보정계수식은 계절에 따른 온도변화를 포함한 건조수축의 실제 실험적 데이터들을 사용하여 제안되었으며, FCM 교량의 장기 거동 조사는 현장에서 건조수축의 수치해석 결과를 적용할 수 있는지 없는지를 결정하기 위해 수행되었다. 본 연구에서 채택된 수치해석 방법은 실제 변형율과 차이가 발생하는 일반적인 방법과는 달리 실제 구조물의 거동특성을 매우 유사하게 모사할 수 있는 것으로 나타났다. 결과적으로 본 연구에서 제안된 방법은 FCM 교량의 장기 처짐에 대한 예측을 향상 시킬 것이다.

핵심용어 : 프린스트레스 콘크리트, 계절별 온도변화, 건조수축, 시간종속, 장기거동, 현장계측

* 정회원, (주)석탑엔지니어링, 공학박사

** 정회원, 고려대학교 공과대학 토목환경학과 교수

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트 교량은 최근에 경제성 및 시공의 용이성 등 여러 가지 이점들로서 고속도로 교량 및 장경간의 교량건설에 자주 이용되고 있다. 특히 균형 캔틸레버 공법(free cantilever method; 이하 FCM)으로 건설되는 교량은 시공중 및 시공후 구조계가 크게 변화하므로 시공단계별 거동특성이 복잡하다. 또한 재료의 시간 종속 변형특성 때문에 응력이 재분배되고 긴장재의 긴장순서 및 부재 타설순서에 따라 단면력이 변화하는 등의 복잡한 거동을 보여 설계 및 시공상의 오류로 인하여 교량 구조물의 구조적 안정성 및 내구성에 심각한 문제를 발생할 가능성이 큰 구조물이다. 또한 앞서 언급한 콘크리트의 시간 종속 변형특성인 크리프(creep)와 건조수축(shrinkage) 등 장기적인 거동특성으로 인하여 구조물의 손상 및 붕괴 등으로 인한 재난을 방지할 수 있다. 따라서 장기거동특성의 정확한 예측이 필수적인 구조물이다.

이러한 구조물 거동의 예측 및 분석을 위해서는 정확한 재료특성치의 산정 및 정밀한 모델링에 의한 해석이 필수적이다. 그러나 이를 이용하여 각 단계별로 해석한다 하더라도 콘크리트의 재료적 비선형성으로 인하여 장기거동 특성치의 예측이 어려우며 환경적 요인에 의한 현장특성을 해석과정에서 정확히 반영하는 것이 거의 불가능하다. 따라서 많은 학자들이 장기거동특성에 대하여 연구하였으나 대부분 콘크리트의 재료특성인 크리프 및 건조수축의 예측모형, 크리프의 수학적 모델링 기법, 시공단계를 고려한 해석기법의 개발에 주력하고 있다. 또한 환경요인의 대표적인 온도의 경우도 단면내의 비선형 온도분포에 의한 영향을 평가하기 위한 연구가 주를 이루고 있다(Elbadry and Ghali,1983). 즉, 환경요인의 변화에 대한 실제 구조물의 장기 거동특성을 예측하기 위한 연구가 상당히 부족한 실정이다(Gamble,1982).

실제로 FCM 교량과 같이 시공 중 다양한 환경요인에 의한 영향을 받는 구조물의 경우는 설계단계에서 실제 구조물의 거동특성을 정확히 예측하기가 매우 어렵다. 이러한 이유로 인하여 재료실험 및 시공중, 완공후 장기계측을 실시하여 PSC 구조물의 장기거동특성을 예측하고자 하는

연구가 수행되어왔다(Waldron et.al,1991).

이러한 연구 결과, 재료실험을 통하여 환경요인의 시간변화에 대한 영향을 고려할 수 있는 예측모형이 제안되었으나(Shiu et.al,1983) 이를 이용하여 실제 구조물의 장기 계측치와의 비교·분석을 하지 않음으로 인하여 실제 적용가능성을 평가하지 못하고 있다. 그러므로 실제 구조물에서 발생하는 여러 환경인자를 고려한 장기거동 예측모형의 개발과 실제 계측을 통한 예측모형의 검증의 필요성이 대두되고 있다.

본 연구에서는 실제교량에 대한 장기계측결과를 이용하여 기존의 장기변형 예측식들을 비교·분석하고 환경요인중 계절별 온도변화(seasonal temperature variation)에 따른 시간 종속 변형특성을 파악하여 실제교량에서 적용될 수 있는 장기거동특성 예측모형을 개발하고자 한다. 이러한 예측모형을 이용하면 구조물의 안정성 및 내구성을 확보하여 장기적인 재난방지효과를 얻을 수 있다.

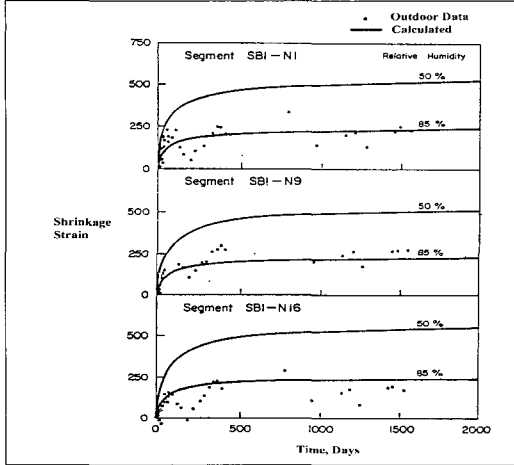
2. 온도변화에 따른 건조수축 변형 특성

일반적으로 사용되는 콘크리트의 시간 종속 변형의 예측모형은 일정한 온도 및 습도를 유지하고있는 실험실 환경에서 많은 실험을 통하여 경험적으로 유도된 모형식이다. 그러나 실제의 구조물은 지속적으로 변화하는 환경하에 노출되어 있으므로 앞서 언급된 예측모형과는 다른 거동특성을 보인다. 특히, FCM 교량과 같이 시공단계별 거동특성이 복잡하고 각각의 단계에서의 응력재분배 현상이 매우 복잡하게 나타나는 구조물에서는 환경요인의 지속적인 변화가 콘크리트의 장기변형특성에 많은 영향을 미친다.

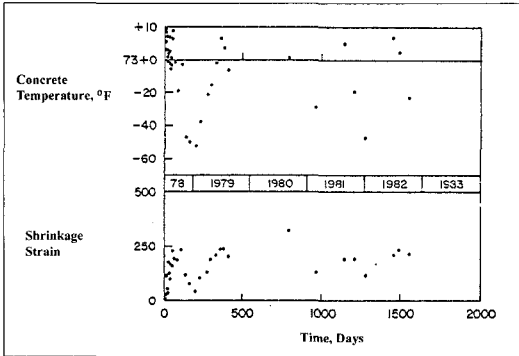
2.1 환경요인의 변화에 따른 건조수축 변형률

Shiu(1983)등은 Kishwaukee River Bridge에 대하여 현장계측을 실시하여 시간 종속 변형특성을 연구하는 과정에서 실제 교량에 사용된 콘크리트를 이용하여 크리프와 건조수축의 실내실험과 대기중에 노출된 시험체에 대하여 건조수축 실험을 수행하였다. 그림 1에는 Shiu등의 실험결과 얻어진 각각의 세그먼트에 사용된 콘크리트에

대한 건조수축 결과를 나타내었다. 그림 2에서 건조수축 변형률은 계절변화에 따라 주기적인 변동을 보이며 온도와 밀접한 상관관계를 가지고 있다.



(a) 대기중 노출상태의 건조수축 변형률



(b) 온도분포와 건조수축 변형률의 비교

그림 1. 환경요인의 변화에 따른 건조수축 변형률(Shiu et.al,1983)

또한 Gamble(1982)은 70 °F, 50% 상대습도 환경과 대기중에 노출된 상태에서 크리프와 건조수축실험을 수행하였으며 그 결과 대기중에 노출된 공시체의 건조수축 변형률이 실험실 환경하의 값에 비하여 상당히 작은 값으로 나타났다. 그러나 크리프의 경우는 거의 유사한 값을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 겨울철에 건조수축변형률이 매우 작은 값을 보이고 있다고 발표하였다.

Shiu등은 이러한 계측치를 비교, 분석하여 상대습도와 대기온도에 의한 건조수축 계수의 상관관계를 도출하였다. 이러한 연구결과는 Bazant (1976) 등의 연구결과에 근거하고 있다. Shiu등의 연구결과와 Gamble의 실험결과에 의하면 건조수축 변형률은 계절별 환경요인 특히, 온도변화에 따라서 매우 크게 변화하고 있으므로 이러한 요인을 적절히 고려하지 않을 경우, 실제 구조물의 거동특성의 예측에 많은 오차가 발생된다. 그러므로 계절별 환경요인의 변화에 따른 건조수축 변형률특성의 적절한 평가방법을 반영한 예측기법을 도입하여야 한다.

2.2 온도변화를 고려한 건조수축 예측모형

Bazant(1978)등은 많은 실험결과에 대한 연구를 통하여 온도변화를 고려한 건조수축 예측모형을 제안하였다. Bazant등의 예측모형은 Bazant-Paula 건조수축 예측모형에 Bazant와 Najjar(1972)에 의하여 제안된 불포화 콘크리트(non-saturated concrete)의 비선형적인 물의 산포 이론(nonlinear water diffusion theory)에 따른 온도 보정계수를 고려한 것으로서 다양한 온도조건에 따른 건조수축 변형률을 산정하는 것이다. Bazant는 온도의 변화가 콘크리트의 diffusivity와 습기의 이동에 따른 활동 에너지(activation energy)를 통하여 콘크리트의 건조수축에 영향을 미친다는 사실을 이론적으로 증명하였다. Bazant-Paula 건조수축 예측모형은 식 (2.1)로 표현된다.

$$\epsilon_{sh}(t', t_0) = \epsilon_{sh\infty} k_h S(t') \quad (2.1)$$

여기서, S는 건조수축 곡선의 형상을 결정하는 함수로서 다음과 같이 정의된다.

$$S(t') = \left(\frac{t'}{\tau_{sh} + t'} \right)^{1/2} \quad (2.2)$$

Bazant등은 단면의 크기효과에 따른 특성치인 τ_{sh} 에 Bazant와 Najjar의 연구결과에 따른 drying diffusivity를 도입하여 온도변화에 따른 변화를 고려하였다.

$$\tau_{sh} = 600 \left(\frac{k_s}{150} D \right)^2 \frac{C_1^{ref}}{C_1(t_0)}, D = 2 \frac{v}{s} \quad (2.3)$$

이때, 다양한 재령 t_0 에서의 건조수축 자료를 분석하면 시간 t 와 기준온도 T_0 에서의 drying diffusivity $C_1(t)$ 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$C_1(t) = C_T k_T' (0.05 + \sqrt{6.3/t}), C_1(T) = C_T k_T' \quad (2.4)$$

여기서, k_T' : 건조에 미치는 온도의 영향을 보정하는 계수

$C_1(t)$ 와 $E(t)$ 값을 결정하는데 있어서 온도의 영향을 표현하기 위하여 시간 t 를 등가수화작용 기간(equivalent hydration period) t_e 로 치환하여야 하며 온도 T 에 대한 $C_1(t)$ 의 의존성을 반드시 고려하여야 하며 이를 이용하면

$$C_1 \approx \frac{T}{T_0} \exp\left(\frac{5,000}{T_0} - \frac{5,000}{T}\right) \quad (2.5)$$

식 (2.4)에서 현재온도가 기준온도와 동일하다면 C_1 값은 1이 되는데 이는 현재온도가 기준온도와 다른 경우에 콘크리트의 건조수축 특성이 달라진다는 것을 의미한다. 식 (2.5)을 이용하면 다양한 온도특성에 따른 콘크리트의 건조수축 변형률을 예측할 수 있다. 그러나 이러한 방법을 통한 예측은 콘크리트의 건조가 진행되는 동안 일정한 온도상태에 있는 경우에 대한 것으로서 온도가 변화하는 경우에 대한 예측은 매우 복잡한 계산과정을 거쳐야 한다. 즉, FCM 교량과 같이 시공단계에 따라 콘크리트의 재령이 달라지는 경우에는 적용하기가 매우 어렵다. 그러므로 보다 실제적인 적용을 하기 위하여 다른 접근방법을 사용하여야 한다.

2.3 건조수축 보정계수 산정

온도변화에 따른 건조수축 변형률의 추정에 있어서 간단하면서 실용적인 방법은 보정계수의 개념을 도입하는 것이다. 즉, 실제 온도변화에 의한 각 부재의 각각의 시간변화에 따른 건조수축 계수를 식 (2.1), (2.2) 및 (2.5)을 적용하여 직접 산정 하는 것이 아니라 기준온도에 대한 건조수축 계수를 미리 산정하고 온도변화가 발생될 경우,

기준온도에 대한 보정계수를 계산하여 미리 산정된 건조수축 계수에 곱하여 현재 시간 및 온도에 대한 건조수축 변형률을 계산하는 것이다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$C_{T, \epsilon_{sh}} = \frac{\epsilon_{sh, T}}{\epsilon_{sh, L}} \quad (2.6)$$

여기서,

$C_{T, \epsilon_{sh}}$: 온도변화에 따른 건조수축 보정계수

$\epsilon_{sh, L}$: 기준온도에 대한 건조수축 변형률

$\epsilon_{sh, T}$: 온도 T 에서 건조수축 변형률

즉, 다양한 온도변화에 따른 건조수축 보정계수 산정식을 수학적으로 표현하면 실제 구조물의 해석과정에서는 기존 예측모형을 이용하여 기준온도에 대한 건조수축 계수를 산정한 다음, 각 해석단계에서 현재의 온도를 입력하고 입력된 온도를 기준온도와 비교하여 보정계수를 계산하여 미리 산정된 건조수축 계수에 곱하여 온도변화에 따른 실제 건조수축 변형률을 계산하는 것이다.

Shiu등은 Bazant의 온도변화를 고려한 건조수축 예측모형을 이용하여 건조수축 보정계수를 산정하였다. Bazant가 제안한 건조수축 예측식에서 식(2.5)로 표현되는 온도변화에 의한 drying diffusivity 값은 shrinkage square half-time이라고 불리우는 τ_{sh} 값을 변화시키며 τ_{sh} 값은 최종 건조수축계수와 건조수축계수의 곡선 형태를 결정하는 $S(t)$ 에 영향을 미치게 된다. 그러므로 건조수축 보정계수 또한 최종 건조수축에 대한 보정계수와 건조수축 곡선에 대한 보정계수로 나누어진 다. 이때 온도변화에 따른 건조수축 보정계수 산정과정은 다음과 같다.

식 (2.5)로 표현되는 drying diffusivity 값을 K_T' 라 정의하면 식 (2.3)에서 τ_{sh} 는 단면의 특성과 온도변화에 따른 K_T' 값에 따라서 변화하는데 특정한 단면의 경우, K_T' 를 제외한 다른 값들은 시간의 변화에 따라 변화하지 않는 상수값으로 나타난다. 그러므로 τ_{sh} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_{sh} = \frac{J}{K_T'} \quad (2.7)$$

여기서, J 는 단면특성에 따른 τ_{sh} 의 값을 나타내는 비례상수(proportional factor)이다.

온도변화에 따른 최종 건조수축값의 보정계수는 다음과 같이 정의된다.

$$C_{T, \epsilon_{sh}} = \frac{\epsilon_{sh_{\infty}, T}}{\epsilon_{sh_{\infty}, L}} \quad (2.8a)$$

$$C_{T, \epsilon_{sh}} = \frac{[4K_T' + 0.85(t_0)K_T' + 0.85(\tau_{sh})]^{1/2}}{[4 + 0.85(t_0) + 0.85(\tau_{sh})]^{1/2}} \quad (2.8b)$$

또한, τ_{sh} 의 값은 식 (2.2)에 의하여 건조수축 계수의 곡선식에 영향을 미치고 있으므로 시간이력을 갖는 온도변화에 따른 건조수축 곡선식의 보정계수는 다음과 같이 정의된다.

$$C_{T, S(t)} = \frac{S(t)', T}{S(t)', L} = \frac{\left(\frac{t'}{\tau_{sh}/K_T' + t'}\right)^{1/2}}{\left(\frac{t'}{\tau_{sh} + t'}\right)^{1/2}} \quad (2.9a)$$

$$C_{T, S(t)} = \frac{(\tau_{sh} + t')^{1/2}}{(\tau_{sh}/K_T' + t')^{1/2}} \quad (2.9b)$$

3. 건조수축 보정계수의 수정제안

3.1 제안식의 특성

Bazant의 이론식에 근거한 보정계수식을 사용한 예측치의 경우, 실제 계측치와 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 재령이 작은 경우에 좀더 크게 나타나는데 이러한 현상은 전체적으로 온도변화에 의한 건조수축 보정계수의 진폭이 상대적으로 작기 때문에 발생한 결과이다. 즉, 식 (2.9)로 표현되는 보정계수식은 보정계수가 제공근의 형태로 나타나므로 온도변화에 따른 건조수축 보정계수의 민감도가 떨어진다. 식 (2.2)로 표현되는 건조수축 곡선식은 ACI Committee 209의 예

측식과 달리 초기재령에서의 수렴속도가 약간 낮게 평가되며 이를 기초로 산정된 보정계수식도 제공근의 형태로서 온도변화에 따른 민감도가 작게 평가되는 것이다. 국내의 경우는 건조수축 변형특성은 ACI 예측모형에 좀더 근접한 양상을 보이고 있으며 이 경우, 식 (2.9)로 정의된 건조수축 보정계수에 의한 실제 구조물의 거동 평가는 오차를 보일 가능성이 매우 높다. 그러므로 ACI 예측모형식에 근접되면서 민감도를 향상시킨 건조수축 보정계수를 산정하여 실제 교량에 적용하여야 한다.

본 연구에서는 Bazant의 연구결과에 의한 온도변화에 따른 건조수축 거동특성을 반영하면서 상대적으로 민감도를 향상시킨 제안식을 제시하였으며 제안된 식의 타당성을 Shiu등의 현장계측결과와 비교하여 평가하였다.

ACI Committee 209에서 제안하고 있는 건조수축 예측모형은 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$\epsilon_{sh}(t) = \left[\frac{t^E}{F + t^E} \right] (\epsilon_{sh})_u \quad (3.1)$$

여기서, E값은 보통 1이며 이 경우, F값은 양생조건에 따라 35, 55의 값을 제안하고 있다. 식 (3.1)으로 표현되는 건조수축 예측모형식은 식 (2.1)의 Bazant-Paula 모델식과 거의 유사한 형태이며 제공근을 제거한 식이다. 식 (2.1)의 예측모형에서 τ_{sh} 값은 일반적으로 시험을 통하여 결정하는 값으로서 보통 150에서 170 사이의 값을 보인다. 식 (2.2)에서의 τ_{sh} 와 식 (3.1)에서의 F값은 공히 건조수축 곡선의 수렴성을 결정하는 값으로서 식 (2.2)이 제공근의 형태로 표현되어 있으므로 τ_{sh} 값이 F값에 비하여 상당히 크다. ACI와 Bazant-Paula 예측모델식의 건조수축 곡선식을 비교하여 보면 ACI 예측모형이 초기재령에서 수렴성이 약간 크게 나타나고 있다.

계절별 온도변화에 따른 건조수축 보정계수는 주기적인 변화를 갖으면서 시간의 경과에 따라 수렴하는 형태로 나타난다. 즉, 건조수축 보정계수식은 주기함수이면서 소멸함수의 형태로 표현되어야 하며 또한 소멸의 정도는 기본적으로 건조수축 계수의 수렴조건과 유사한 형태를 유지하여야 한다. James의 보정계수식도 이러한 조건을

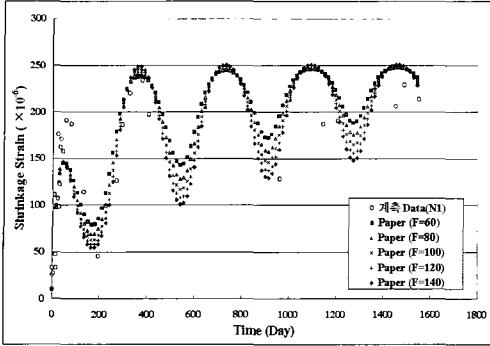


그림 2. 제안식의 F값 변화에 따른 계측치와 예측치의 비교 (segment SB-N1)

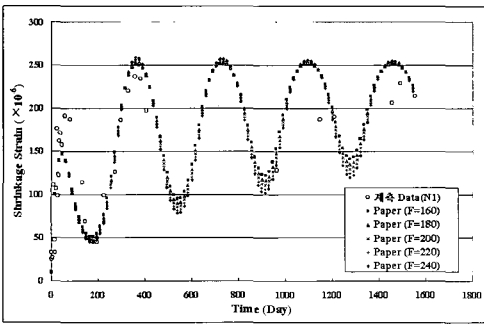
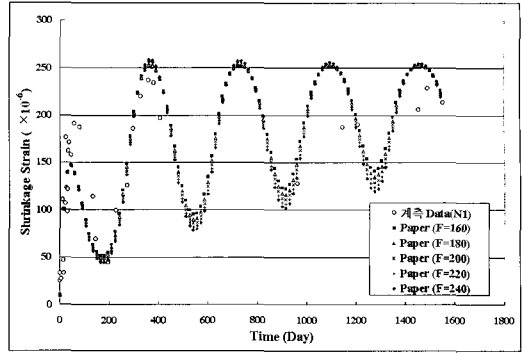
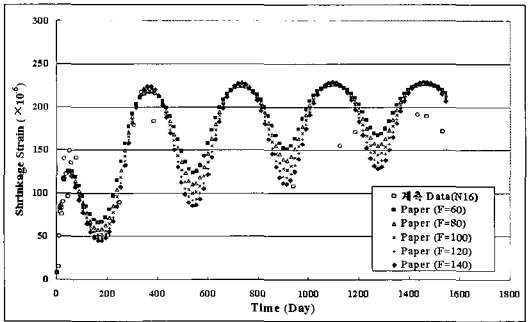


그림 3. 제안식의 F값 변화에 따른 계측치와 예측치의 비교 (segment SB-N16)



만족시키는 상태에서 제안된 식으로서 본 연구에서 제안된 식의 형태도 위의 조건을 만족하여야 한다.

따라서 Shiu 등의 보정계수식보다 민감도를 향상시키면서 보정계수식의 조건을 만족하기 위하여 본 연구에서는 식 (3.1)의 ACI 예측모형의 형태를 사용하였으며 이 경우에는 F값의 변화에 따라서 수렴성이 결정된다. 그러므로 식 (2.9)에 나타난 건조수축 보정계수식을 참고하여 ACI 예측식과 유사하며 상대적으로 민감도를 향상시킬 수 있는 보정계수식은 온도변화에 따른 drying diffusivity 값, K_T' 를 F에 적용시켜서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{T', \varepsilon_{sh}} = \frac{\varepsilon_{sh} \cdot T}{\varepsilon_{sh} \cdot L} \quad (3.2a)$$

$$C_{T', s(t)} = \frac{\left(\frac{t'}{F/K_T' + t'} \right)}{\left(\frac{t'}{F + t'} \right)} \quad (3.2b)$$

식(3.2b)를 정리하면, ACI Committee 209의 모형식에 대한 온도변화에 따른 건조수축 보정계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{T', s(t)} = \frac{F + t'}{F/K_T' + t'} \quad (3.3)$$

건조수축 보정계수식에서 F값의 변화에 따라서 식 (2.9)의 Bazant 보정계수식과 동일하게

특성이 달라지게 된다. 그러나 보정계수의 진폭변화는 온도변화에 상대적으로 민감한 형태가 된다.

3.2 건조수축 보정계수 제안식의 통계학적 계수값 결정

앞서 제안된 온도변화에 따른 건조수축 보정계

표 1. 수정 제안식의 값의 변화에 따른 통계학적 오차 비교(segment SB-N1)

구분	Shiu 예측식	수정 제안식의 F값									
		60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
AMB	34.914	34.224	33.688	33.420	33.138	32.941	32.970	33.080	33.129	33.397	33.611
AMRB	0.2768	0.2670	0.2614	0.2590	0.2568	0.2552	0.2548	0.2549	0.2559	0.2580	0.2602

표 1. 수정 제안식의 값의 변화에 따른 통계학적 오차 비교(segment SB-N16)

구분	Shiu 예측식	수정 제안식의 F값									
		60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
AMB	30.455	30.287	28.805	27.770	26.858	26.179	26.140	26.507	26.879	27.211	27.495
AMRB	0.3432	0.3452	0.3299	0.3206	0.3124	0.3078	0.3086	0.3129	0.3169	0.3203	0.3232

수식에서는 F값이 미지수로 표현된다. 이때, F값은 주기적인 온도변화에 따른 건조수축 보정계수의 진폭의 크기를 결정하며 또한, 이러한 진폭의 소멸정도에 영향을 미친다. 즉, F값이 작을 경우의 건조수축 보정계수는 초기재령에서 크기가 작은 주기적인 진폭변화를 보이다가 재령의 증가에 따라 급격히 수렴하는 형태를 보인다. F값이 클 경우에는 초기의 주기적인 진폭이 크게 나타나고 재령의 증가에 따른 수렴속도가 감소한다.

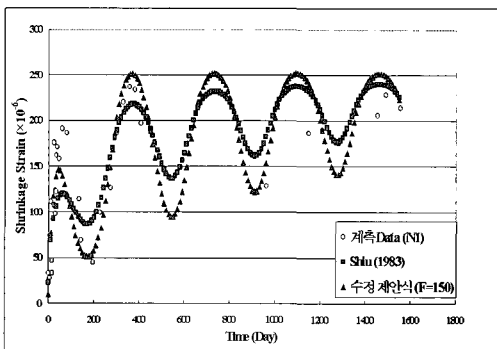
이러한 특성을 보이는 F값을 결정하기 위하여 Shiu 등의 건조수축 실험값을 사용하였다. 또한 F값을 결정하기 위하여 F값을 60에서 240까지 변화시켜가면서 건조수축 보정계수를 계산하고 실험실 환경하에서의 건조수축 계수에 곱하여 온도변화에 따른 건조수축 변형률을 산정하였다

실험에 사용된 계절별 온도분포값은 앞서 언급한 건조수축 실험에서 측정된 온도 계측치를

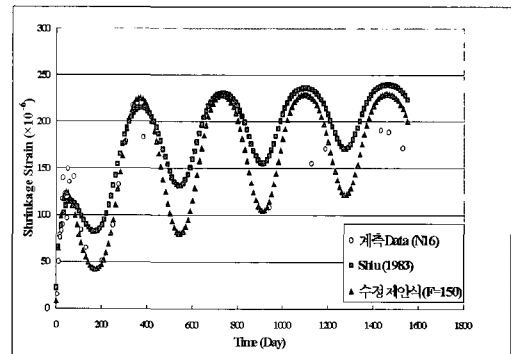
Fourier 급수를 이용하여 모사한 값을 사용하였다. 그림 2와 그림 3에는 본 연구의 건조수축 보정계수 제안식인 식(3.3)의 F값을 변화시키면서 산정된 건조수축 보정계수값을 적용하여 예측한 계절별 온도변화에 따른 건조수축 변형률값을 Shiu 등의 실험결과와 비교하여 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제안된 건조수축 보정계수식을 사용한 예측치가 계측치와 유사한 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 특히, 초기재령의 경우, 계측치와 거의 동일한 값을 보이고 있다. F값의 변화에 따른 거동은 F값이 커지면서 예측치와 계측치의 오차가 작아지다가 F값이 180을 넘어서면서 오차가 점점 커지고 있음을 알 수 있다.

이러한 F값의 변화에 따른 특성을 좀더 정확히 분석하기 위하여 본 연구에서는 계측치와 예측치간의 오차를 통계학적 방법으로 평가하여 보았다.



(a) segment SB-N1



(b) segment SB-N16

그림 4. Shiu 등의 보정계수식과 수정 제안식의 비교

실제 이러한 통계학적 오차 평가에는 매우 많은 방법들이 제안되어 있으나 본 연구에서는 잔차 절대치의 평균(Absolute Mean Bias; AMB)값을 이용한 방법과 상대잔차 절대치의 평균(Absolute Mean Relative Bias; AMRB)값을 이용한 방법을 사용하여 평가하였다. 표 1과 표 2에는 F값의 변화에 따른 AMB 방법과 AMRB 방법에 의하여 계산된 계측치와 예측치의 오차를 Shiu 등의 예측식의 오차와 비교하여 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 본 연구에서 수정 제안된 건조수축 보정계수식을 사용한 경우가 모든 F값에 대하여 Shiu 등의 예측식에 비하여 오차가 작은 것으로 나타났다.

F값의 변화에 따라서는 앞서 언급한 바와 같이 F값의 증가에 따라 오차가 점점 감소하다가 F값이 160보다 커지면 오차가 증가하는 양상을 보이고 있다. 또한 가장 작은 오차를 보이는 경우는 오차 평가방법에 따라서 약간의 차이를 보이고 있으며 F값이 140과 160일 때인 것으로 나타났다.

표 1. 수정 제안식의 F값의 변화에 따른 통계학적 오차 비교 (segment SB-N1)이고 있으며 F값이 140과 160일 때인 것으로 나타났다.

본 연구에서는 수정 제안된 건조수축 보정계수의 F값을 가장 오차가 적은 구간의 평균값인 150으로 결정하여 다음과 같은 건조수축 보정계수식을 제안하였다.

$$C_{r', s(t)} = \frac{150 + t'}{150/K_{r'} + t'} \quad (3.4)$$

그림 4에는 본 연구에서 수정 제안된 건조수축 보정계수와 Shie 등의 보정계수식을 사용하여 예측된 건조수축 변형률을 James의 계측치와 비교하여 나타내었다. 그림 4에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제안된 보정계수식을 사용하면 보다 정확하게 계절별 온도변화에 따른 건조수축 변형률의 변화를 예측할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 계절별 온도변화에 의한 FCM 교량의 장기거동 특성을 예측할 수 있는 예측모

형을 개발하여 구조물의 장기적인 안정성 및 내구성을 확보함으로써 구조물 붕괴 등 재난을 방지하기 위하여 계절별 온도변화 성분이 포함되어 있는 건조수축 실험결과를 이용하여 계절별 온도변화를 고려한 건조수축 보정계수식을 수정 제안하였다. 계절별 온도변화를 고려한 건조수축 보정계수식을 산출하기 위하여 Shiu 등의 건조수축 실험결과와 Bazant의 이론을 적용하여 통계학적 분석을 수행한 후, 다음과 같은 수정 제안식을 도출하였다.

$$C_{r, s(t)} = \frac{150 + t'}{150/K_{r'} + t'}$$

제안된 보정계수식은 기존의 Bazant의 이론에 근거한 Shiu 등의 보정계수의 특성을 유지하면서 온도변화에 따른 민감도를 향상시킨 것으로서 기존의 보정계수식 보다 실제 계측치와 더욱 유사한 결과를 보이고 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 계절별 온도변화를 고려한 건조수축 예측모형을 이용하여 PSC 콘크리트 교량의 장기거동특성의 예측에 적용될 수 있다.

참 고 문 헌

- 이 선호 (2000). "계절변화에 따른 PSC 균형켄틸 레버 교량의 장기거동 특성."공학박사 학위논문, 고려대학교.
- 이 학은, 이 선호, 신 문규 (1999). 균형 캔틸레버 콘크리트 교량의 온도분포 특성에 관한 연구. 1999년도 대한토목학회 학술발표회 논문집(I), pp.109-112
- ACI Committee 209R-92. (1994). Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI Manual of Concrete Practice, Part I
- Bazant, Z. P. and Najjar, L. J. (1972). Nonlinear Water Diffusion in Non-saturated Concrete, Material and Structures (RILEM, Paris), Vol. 5, pp.3-20
- Bazant, Z. P., Osman, E. and Thonguthai, W. (1978). Practical Formulation of Shrinkage and Creep of Concrete, Materials and Structures (RILEM, Paris), I and II: Vol. 9, No. 54, pp.395-406

- Bazant, Z. P. and Panula, L. (1978). Practical Prediction of Time-Dependent Deformations of Concrete, Materials and Structures, Part I and II: Vol. 11, No. 65, pp.307-328, Part III and IV: Vol. 11, No. 66, pp.415-434, Part V and VI(1979): Vol.12,No. 69, pp.169-183.
- CEB-FIP Model Code for Concrete Structures (1990). Comite Euro-International Du Beton
- Gamble, W. L. (1982). Creep of Concrete in Variable Environments, Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 108, No. ST10, Oct. pp.2211-2222.
- Lee, H. E., Lee, S. H. and Jeon, B. G. (1997). Time-Dependent Behavior Under Construction in Prestressed Concrete Bridge Built by Free Cantilever Method, Proceeding of 22nd Conference on Our World in Concrete & Structures, pp.
- Shiu, K., Daniel, I. J. and Rssell, H. G.(1983). Time-dependent Behavior of Segmental Cantilever Concrete Bridges, Construction Technology Laboratories a Division of Portland Cement Association, Report No. FHWA/ L/PCA-001