

2경간 연속 강합성거더의 개선된 부정정력 계산 방법

지구삼* · 김충언** · 신동기*** · 최동호****

Ji, Gu Sam*, Kim, Choong Eon**, Shin, Dong Ki***, Choi, Dong Ho****

Improved Method for Indeterminate forces of Two-span Steel-concrete Composite Girders

ABSTRACT

The k-factor method has been widely used in design of steel-concrete composite bridges to determine indeterminate stresses. The accuracy of k-factor method is examined by a comparative analysis with the equivalent load method in a continuous 2-span composite bridge. To improve the accuracy, the direction of creep stress has to be modified and the variety of section must be considered. This paper suggests j-factor method which can improve the accuracy of k-factor method with simple modification.

Keywords : Composite Girder, Continuous Bridge, Indeterminate Forces, k-Factor Method, j-Factor Method

초 록

k-factor법은 합성교량의 설계에서 부정정 응력을 산정하는 방법으로 널리 사용되고 있다. 이 방법의 적정성을 평가하기 위하여 2경간 연속 강합성거더에 대하여 등가하중법과 비교하였다. k-factor법은 크리프에 대해서는 강재응력을 과소평가하고, 부모멘트 구간에서는 응력의 방향을 반대로 산정하며, 건조수축이나 온도차에 대해서는 단면변화를 고려하지 못하는 것을 확인하였다. 이 논문에서는 k-factor법의 정확성을 개선하면서, 계산의 편리성은 유지할 수 있는 j-factor법을 제안하였고, 그 효과를 2경간 연속 강합성거더에 적용하여 검증하였다.

검색어 : 합성교량, 연속교, 부정정력, k-Factor법, j-Factor법

1. 서론

교량 상부구조물 설계에서 프리스트레스 하중과 콘크리트의 크리프와 건조수축 하중에 대한 영향을 고려할 때, 정정 구조에서는 텐던의 배치 혹은 콘크리트 및 강재의 단면구성에 따라 단면에 직접 발생하는 단면력(primary force)만 고려하면 된다. 그러나 외적 부정정 요인이 있는 경우는 직접 단면력에 의해 발생하는 부정정 반력에 따른 2차 단면력(secondary force)도 고려하여야 한다.

프리스트레스 하중에 의한 2차 단면력의 개념은 이를 배제할 수 있는 텐던 배치인 컨코던트 배치 등에서 표현되며, 통상의 설계에서는 이러한 2차 단면력을 고려할 수 있는 해석 프로그램(RM, MIDAS 등)을 사용한다.

합성교량에서의 2차 부정정력은 설계기준의 합성거더편에서도 그 개념을 제시하고 있다. 정확한 설계를 위해서는 강재와 바닥판을

* 삼현피에프 기술연구소, 공학석사 (jjigu3eo@nate.com)

** 정회원 · 교신저자 · 삼현피에프 기술연구소, 공학석사 (Corresponding Author · SamhyunPF@hanmail.net)

*** 삼현피에프 기술연구소장, 공학박사 (dkshin112@nate.com)

**** 정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사 (samga@hanyang.ac.kr)

Received September 27 2012, Revised November 8 2012, Accepted December 17 2012

별도로 모델링하여 부정정력의 영향을 산정하여야 하지만, 일반적인 합성교량에서는 강재와 바닥판이 합성된 부재를 프리임요소로 설계하고 있기 때문에, 2차부정정력 산정에는 간략화된 방법을 사용한다. k-factor법은 대표적인 간략법으로 많은 설계에 적용되고 있을 뿐만 아니라 도로설계편람 및 철도설계편람에도 반영되어 있는 방법이다.

본 연구의 목적은 범용적인 방법인 k-factor법의 정확성을 분석하고, 이를 보완할 수 있는 간편한 설계방법을 제시하는 것이다. 이를 위해 설계 예제에 대하여 등가하중법과 k-factor법의 결과를 비교분석하였다. 이를 통하여 k-factor법의 오차원인을 파악하고, 이를 개선하는 설계방법을 제안하고자 한다.

2. 부정정력 설계의 기본개념 및 해석결과

2.1 내적 부정정력

합성교량에서는 두 재료가 한 단면으로 구성되어 외력에 대한 동일한 변형요구도에 저항한다. 그러나 콘크리트의 건조수축 및 크리프, 바닥판과 강재거더의 온도차 등에 대해서는 두 재료, 즉 강재와 콘크리트에 대해 서로 다른 변형요구도가 발생한다. 이러한 변형요구도의 차이는 내력변화를 유발하며, 이를 부정정 내력 또는 내적 부정정력이라고 한다.

이러한 내적 부정정력의 작용 메커니즘을 건조수축 하중에 대해 개념적으로 설명하면 Table 1과 같다. 콘크리트는 건조수축변형에 대해, 응력의 변화 없이 수축하려고 하지만 이질재료인 강재가 이를 막기 때문에 원하는 만큼 수축을 하지 못한다. 또한 강재는 기존의 상태를 유지하려고 하지만, 콘크리트가 강재를 수축시키게 된다. 따라서 강재에는 압축응력이 발생하게 되고, 콘크리트에는

Table 1. Mechanism of Internal stress

	concrete member	composite member (steel-concrete)
behavior		
stress	None	$\Delta f_{con} = 2E_c \frac{d_1 - d_2}{L} \text{ (tensile)}$ $\Delta f_{steel} = 2E_s \frac{d_2}{L} \text{ (compressive)}$ <p>d_1: deformation demand d_2: actual deformation</p>

변형요구량과 실제 변형량의 차이만큼 인장응력이 발생하게 된다. 이 때 발생하는 두 힘은 평형조건을 만족한다.

본 논문은 내적 부정정력에 의한 외적 부정정력(2차 부정정력)을 고려하는데 목적이 있기 때문에 내적 부정정력 계산을 위한 정밀한 해석과정과 설명은 생략하고, 도로교 설계기준(2010, 한국도로교통협회)의 크리프계수 및 건조수축률을 이용하였으며, 설계자들이 쉽게 접근할 수 있고 간략화 되어있는 야쓰미(安宅) 해법에 기초한 계산방법을 적용하였다.

2.2 외적 부정정력의 영향 고려법

2.2.1 기본원리

도로교 설계기준 해설(2010, 한국도로교통협회)에 의하면 외적 부정정력을 계산하기 위해서는 부정정 구조에 대한 해석을 선행하여야 하며, 이 때 발생하는 부정정 반력을 이용하여 ΔM 을 구하고, 응력을 계산하여야 한다. 아래의 식은 도로교 설계기준의 크리프에 대한 응력산정식이다.

바닥판콘크리트

$$\Delta f_c = \frac{1}{n_1} \left[\frac{P_\phi}{A_{v1}} + \frac{(M_\phi + \Delta M) y_{v1}}{I_{v1}} \right] - E_{c1} \frac{f_c}{E_c} \phi_1 \quad \text{식 (1a)}$$

강재거더

$$\Delta f_s = \frac{P_\phi}{A_{v1}} + \frac{(M_\phi + \Delta M) y_{v1}}{I_{v1}} \quad \text{식 (1b)}$$

여기서,

$\Delta f_c, \Delta f_s$: 콘크리트와 강재의 응력변화

n_1 : 크리프응력 산정시 탄성계수비

P_ϕ, M_ϕ : 크리프에 의한 축력과 모멘트

ΔM : 2차 단면력(부정정 모멘트)

A_{v1}, I_{v1}, y_{v1} : 크리프응력 산정시 합성단면의 단면적, 단면2차모멘트, 도심거리

f_c : 크리프를 발생시키는 응력

E_c : 콘크리트 탄성계수

E_{c1} : 크리프에 대한 콘크리트 탄성계수

ϕ_1 : 크리프 계수

2.2.2 k-factor 해석법

k-factor 해석법은 2차부정정력을 고려하기 위하여 필요한 여러 단계를 거치지 않고 이를 계산할 수 있는 방법으로, 도로설계편람(2008, 국토해양부) 제5편 교량편 등에 수록되어 있다. 또한 많은 참고도서의 설계 예제에 적용되어 국내 설계자들이 주로 사용하고 있는 방법이다. 이는 교량의 전체에서 단면변화가 없는 것을 가정하

며, 원리는 다음과 같다.

부정정력에 의한 영향을 고려하기 위하여, 모든 부재의 경계가 구속된 경우를 가정한다. 바닥판 콘크리트에 부정정 변형이 발생하면 Fig. 1과 같이 Fixed End Reaction($P_{R,i}$, $P_{R,j}$, $P_{R,k}$...)이 발생한다.

구속된 자유도를 실제 구조계의 경계조건에 맞춰서 해제하면 Fixed End Reaction의 역방향으로 경계조건 해체에 의한 Released Force가 작용하며, 이 힘은 Fig. 2에서의 같이 구조물 거동의 중심인 합성단면의 도심으로 축력과 모멘트로 환산한다.

각 부재별로 초기변형량이 같고 교량의 단면이 모두 동일하다면 $P_{R,i} = P_{R,j} = P_{R,k} = \dots = P$ 이므로 최종적으로 단부에 작용하는 축방향력 P 와 집중 모멘트 M 만 남게 되어, Fig. 3과 같은 Released System을 구성할 수 있다.

결론적으로 부정정의 영향은 구조물 양 끝단에 단위 집중 하중이 작용하는 경우로 간략하게 구할 수 있게 된다. 즉 단위하중이 작용할 때 발생하는 모멘트를 영향계수(k-Factor)로 구하고, 여기에 직접적으로 발생하는 모멘트(primary moment)를 곱하여 2차 단면력이 고려된 단면력을 산정하는 것이 k-factor법이다. 이 때 축력에 대해서는 부정정요인이 없기 때문에 무시한다.

k-factor법은 대상구조 전체에 걸쳐 동일한 내적 부정정력이

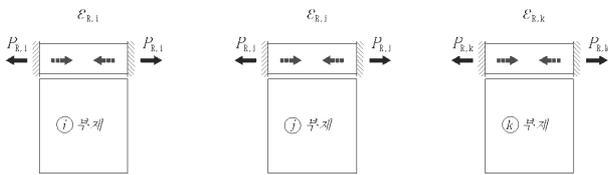


Fig. 1. Fixed End Reaction

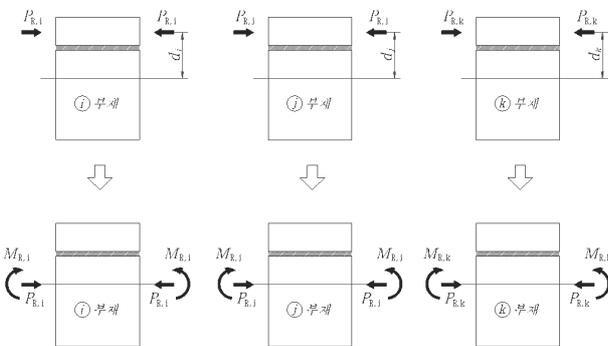


Fig. 2. Released Force

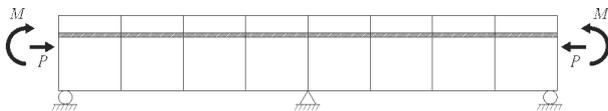


Fig. 3. Released System

발생하는 것으로 가정하여, 외적 부정정 효과를 고려하는 k-factor를 산정함으로써 추가의 계산을 배제할 수 있는 방법이다.

식 (2)는 k-factor를 사용하여 응력을 계산하는 수식을 정리한 것인데, 식 (1)에서 ($M_\phi + \Delta M$)가 $k M_\phi$ 로 대체된다.

$$\Delta f_c = \frac{1}{n_1} \left(\frac{P_\phi}{A_{v1}} + \frac{k M_\phi y_{v1}}{I_{v1}} \right) - E_c \frac{f_c}{E_c} \phi_1 \quad \text{식 (2a)}$$

$$\Delta f_s = \frac{P_\phi}{A_{v1}} + \frac{k M_\phi y_{v1}}{I_{v1}} \quad \text{식 (2b)}$$

여기서,

k : k-factor

(릴리즈 시스템에서 $P=1, M=1$ 일 때의 모멘트)

2.2.3 등가하중법

2차 단면력은 부정정 구조계에서 외적 부정정 반력에 의해 나타나는 단면력이므로 부정정 반력을 정확히 계산하는 것이 중요하다. 이 부정정 반력은 내적 부정정력에 의한 반력이므로, 내적 부정정력의 분포와 동일한 단면력도를 발생시키는 등가의 하중이 재하된 경우의 반력과 동일하다. 즉 등가의 하중을 산정할 수 있다면 2차 단면력을 정확하게 고려할 수 있게 된다.

등가하중법은 이러한 원리를 바탕으로 하여, 부정정력을 산정하는 기본원리에 충실한 방법이다. 등가하중법의 절차는, 1)대상구조물의 내적 부정정력 분포를 산정하여, 2)동일한 단면력 분포를 발생시키는 등가의 하중을 계산하고, 3)이 등가의 하중을 구조계에 재하함으로써 최종 단면력을 계산한 다음, 4)계산된 단면력으로 응력을 산정하는 방법이다. 이에 따라 등가의 하중을 산정하는 단계와 추가의 구조해석 단계를 거치게 되지만, 내적 부정정력과 외적 부정정력이 동시에 고려된 단면력을 정확하게 산정할 수 있다. 이 때 등가하중의 적정성은 외적 부정정 요인이 제거된 구조계에 등가하중을 재하하여 발생하는 단면력도가 내적 부정정력의 분포와 동일함을 검토하여 확인할 수 있다.

식 (3)는 등가의 집중하중을 산정하는 방법을 표현한 것이며, 식 (4)는 각 부재마다 재하되는 등가의 분포하중을 산정하는 방법으로 크리프, 건조수축 등에 모두 적용할 수 있다. 본 논문에서는 부재 내에서 모멘트가 선형적으로 변하는 것으로 가정하였다

$$CM = M_{(ri)} - M_{(fj)}, CP = P_{(ri)} - P_{(fj)} \quad \text{식 (3)}$$

여기서,

CM : 절점의 모멘트 하중(집중하중)

CP : 절점의 축 하중(집중하중)

$M_{(fj)}$: 앞부재(front)의 j 단 모멘트

$M_{(ri)}$: 뒤부재(rear)의 i 단 모멘트

$P_{(fj)}$: 앞부재(front)의 j 단 축력

$P_{(ri)}$: 뒤부재(rear)의 i 단 축력

$$DM = \frac{M_{(j)} - M_{(i)}}{L}, DP = \frac{P_{(j)} - P_{(i)}}{L} \quad \text{식 (4)}$$

여기서,

DM : 부재의 모멘트 하중(분포하중)

DP : 부재의 축 하중(분포하중)

$M_{(i)}, M_{(j)}$: 부재의 i, j 단 모멘트

$P_{(i)}, P_{(j)}$: 부재의 i, j 단 축력

L : 부재의 길이

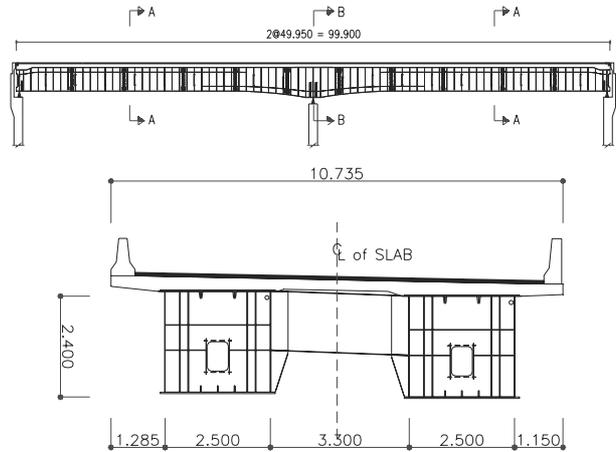


Fig. 4. A Bridge for Example

3. 설계현황분석

3.1 설계현황

설계에서 많이 사용되고 있는 k-factor법은 다음과 같은 장점이 있다.

첫째, k-factor법을 이용하면 모든 단면에 대한 부정정 내력계산을 수행할 필요가 없다. 원칙적으로는 내적 부정정 하중을 계산하기 위해, 모든 단면에 대하여 별도의 탄성계수에 의한 단면계수 산정과 응력검토를 실시하여야 한다. 그러나 k-factor법을 이용하면 필요한 단면에 대해서만 응력검토를 수행할 수 있다.

둘째, k-factor법을 활용하면 추가의 해석절차가 불필요하다. 예를 들어, 크리프에 의한 부정정력을 산정하기 위해서는 합성후 고정하중에 대한 구조해석을 실시하여 모든 단면에 대한 응력을 분석하고, 모든 절점의 내적 부정정력을 산정한다. 이를 이용하여 구조해석 모델에 입력할 하중을 결정하여 추가의 해석을 실시하여야 한다. 그러나 k-factor법에서는 합성후 고정하중 해석시에 값을 구하여 외적 부정정 요인을 계산할 수 있다.

3.2 예제를 통한 현황분석

3.2.1 예제교량

부정정력 계산방법의 현황 및 적정성을 파악하기 위하여 2@50=100m의 실교량에 대한 비교검토를 실시하였다. 경간부와 지점부의 형고는 각각 1.9m, 2.4m이고, 2륜 박스교량인 경우이며, 종단면도 및 횡단면도는 Fig. 4와 같다.

부정정력 계산에 필요한 합성된 단면에 대한 단면 제정수를 교량전장에 걸쳐 Fig. 5에 나타내었다. 부모멘트가 발생하는 교각 위치에서는 형고가 증가할 뿐만 아니라 두꺼운 강재가 적용되어 단면정수가 커지며, 정모멘트가 큰 위치에도 두꺼운 강재가 적용되

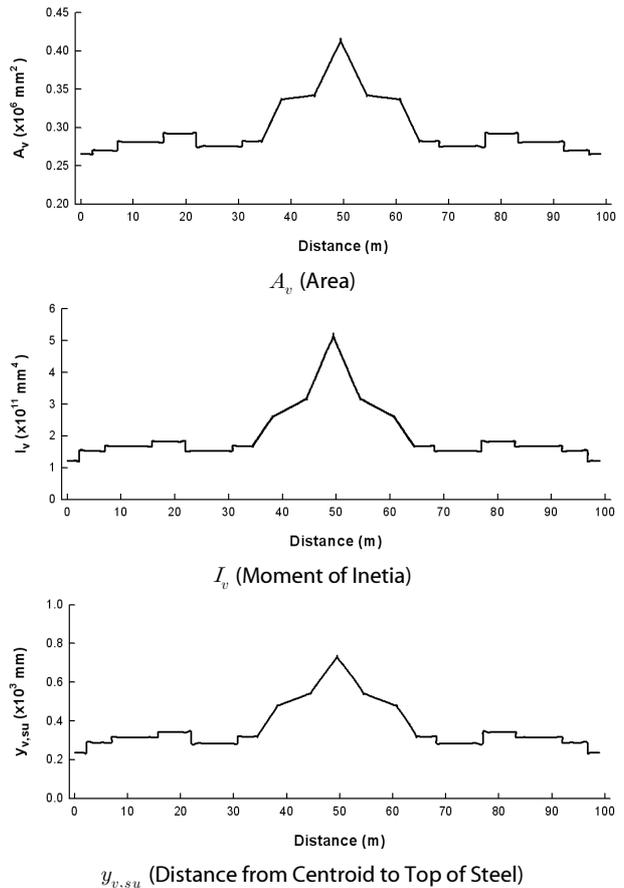


Fig. 5. Section Property

있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 크리프의 원인이 되는 합성후 고정하중에 대한 모멘트이며, Fig. 7은 콘크리트의 크리프 하중 산정시 필요한 바닥판 중심에서 합성후 고정하중에 의한 응력이다.

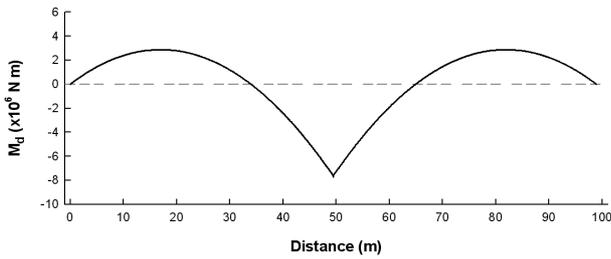


Fig. 6. Dead Load Moment(M_d)

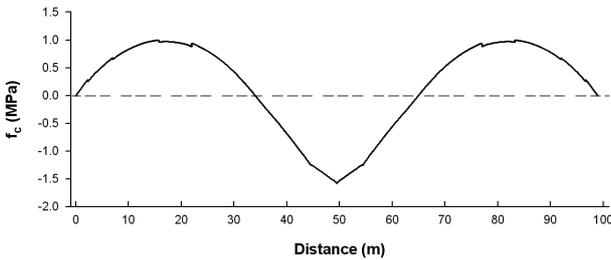


Fig. 7. Mean Stress of Deck(f_c)

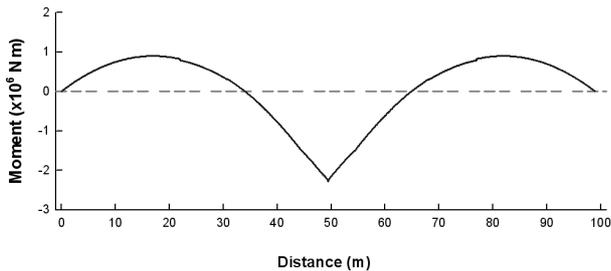
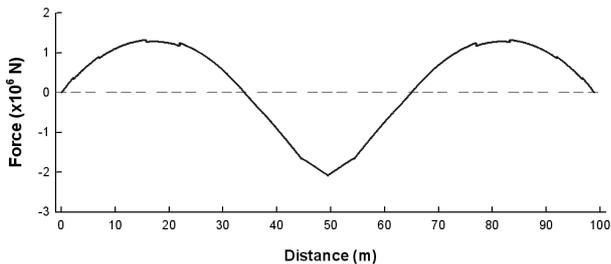


Fig. 8. Creep Forces(Internal Indeterminacy)

3.2.2 내적 부정정력 산정

콘크리트의 크리프와 건조수축에 의해 발생하는 단면력 및 응력의 계산 방법은 도로교 설계기준(2010, 한국도로교통협회)을 참조하였다.

크리프에 의해 발생하는 내적 부정정 단면력은 Fig. 8과 같다. 축력은 바닥판의 중심응력(Fig. 7), 크리프 계수(ϕ) 및 바닥판 단면적(A_c)의 곱으로 계산되기 때문에, Fig. 7의 경향을 따르며 모멘트는 축력과 바닥판 도심거리(Fig. 5)의 곱으로 계산된다.

건조수축에 대한 단면력은 Fig. 9와 같다. 바닥판의 단면적(A_c)

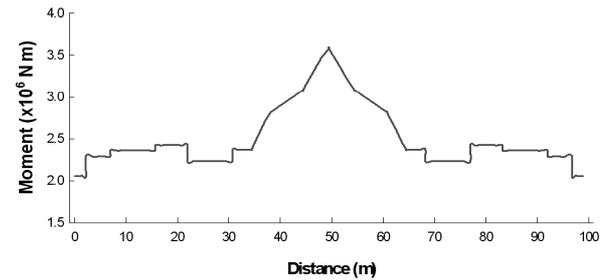
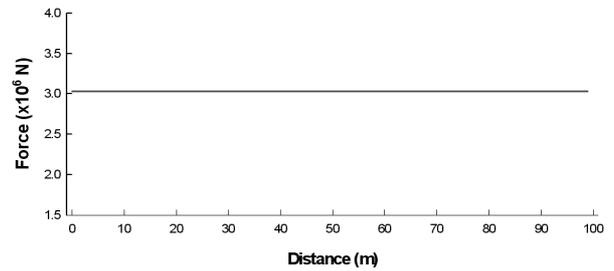


Fig. 9. Shrinkage Forces(Internal Indeterminacy)

이 일정하기 때문에 건조수축에 대한 탄성계수(E_c)와 건조수축 변형률(ϵ_s) 및 바닥판 단면적의 곱으로 산정되는 건조수축에 의한 축력($= E_c \epsilon_s A_c$)은 일정한 값을 보이고, 모멘트는 축력과 바닥판 도심거리의 곱이므로, 단면중립축의 변화(Fig. 5)에 따른 분포를 나타내고 있다.

3.2.3 외적 부정정력 산정 - 등가하중법

예제에서 등가하중은 외적 부정정 요인이 없는 경우 Fig. 8과 Fig. 9와 동일한 분포의 단면력이 발생하도록 하는 하중이다. 이러한 등가의 절점하중과 분포하중을 식 (3)과 (4)에 의해 요소별로 계산할 수 있고, 이것을 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다.

등가하중의 정확성은 2경간 연속교에서 외적 부정정요인인 중간 지점부를 제거한 구조에 등가하중을 재하하여 산정한 단면력과 3.2.2에서 산정한 내적 부정정력을 비교하여 검증할 수 있다. 검증된 등가하중을 부정정구조에 재하하고 해석하면 외적 부정정을 고려한 최종 단면력을 얻게 된다.

Fig. 12와 Fig. 13은 앞에서 산정된 등가의 절점하중과 분포하중을 연속교 모델에 재하하여, 2차 단면력의 요인을 반영한 최종단면력을 계산한 것이다.

Fig. 12는 크리프에 의한 단면력도를 나타내는 것인데, 내적 부정정 단면력도(Fig. 8)와 동일하게 나타난다. 이것은 크리프 계산 시 사용하는 f_c (바닥판 중심의 응력)에 이미 외적 부정정 조건이 반영되어서 외적 구속력, 즉 부정정반력이 발생하지 않기 때문으로 프리스트레스의 컨코던트 텐던배치 효과와 유사하다. Fig. 13의 건조수축에 의한 단면력도에서는 내적 부정정 단면력도와 다르고, 단면 변화의 영향이 나타남을 확인할 수 있다.

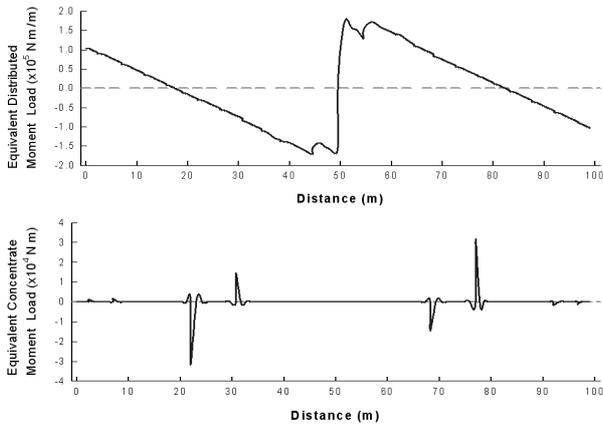


Fig. 10. Equivalent Moment for Creep

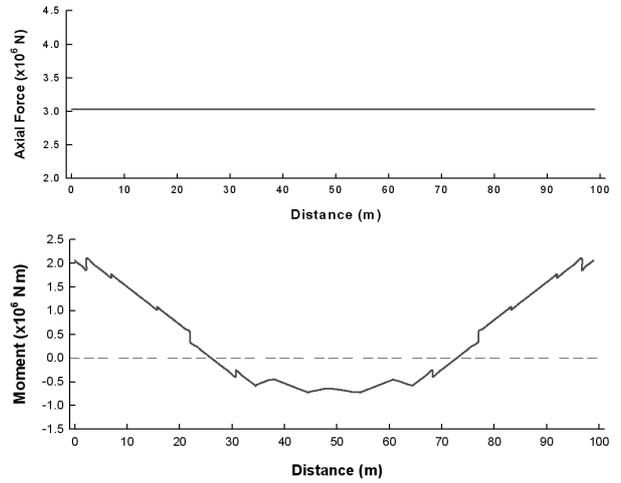


Fig. 13. Resultant Force of Shrinkage(P_2, M_2)

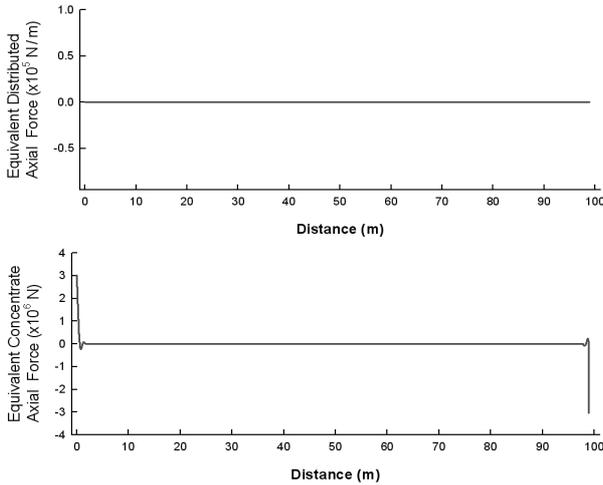


Fig. 11. Equivalent Axial Load for Shrinkage

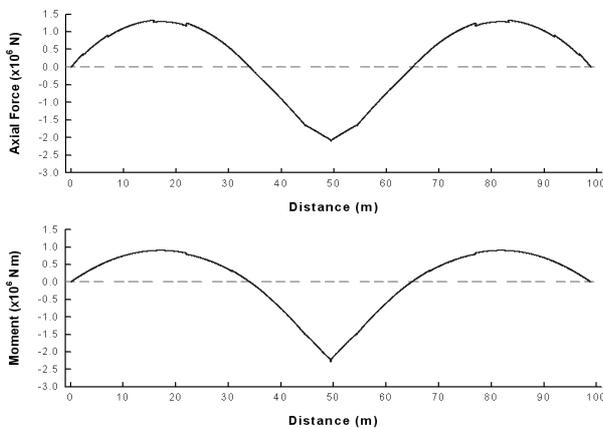


Fig. 12. Resultant Force of Creep(P_ϕ, M_ϕ)

3.2.4 외적 부정정력산정 - k-factor법

설계편람에서 제시하고 있는 k-factor를 활용하여 부정정력에

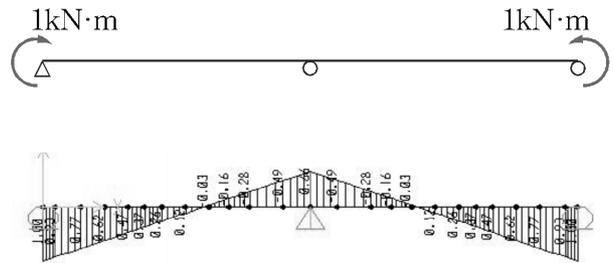


Fig. 14. k-factor

의한 응력을 산정하기 위하여 Fig. 14에서와 같이 양단에 단위 집중 모멘트를 재하하였다.

3.2.5 등가하중법과 k-factor법의 비교

등가하중법은 내적 부정정 요인에 의한 하중과 외적 부정정 요인에 의한 결과가 조합되어 산정되므로 도출되는 휨모멘트가 최종결과이고, k-factor법을 적용할 경우 내적 부정정력에 k-factor를 곱한 값이 최종 휨모멘트이다. 이 두 단면력을 그래프로 비교하여 나타내면 Fig. 15, Fig. 16과 같다.

결론적으로 k-factor법을 활용하여 콘크리트 크리프를 계산함에 있어서는, 하중 산정과 k-factor 산정에 각각 부정정 요인을 고려하기 때문에, 이를 중복고려를 하게 된다. 따라서 등가하중법과 비교하면 단면력 형상에 있어 곡선의 치수가 큰 형상을 나타낼 뿐만 아니라 부모멘트가 나타나야 할 위치에 정모멘트[:(-)(-)=(+)]가 나타나게 된다.

건조수축에 대해서 k-factor법을 적용할 경우, 형고변화나 강제 치수 변화의 영향을 적용할 수 없기 때문에 단순한 형태로 나타나지만, 실제 구조물에서는 단면변화의 영향이 반영된 단면력이 나타난다.

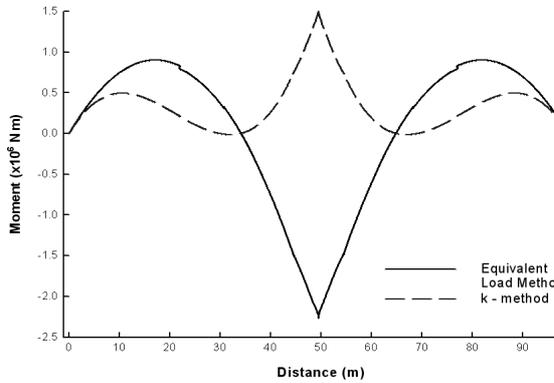


Fig. 15. Moment due to Creep

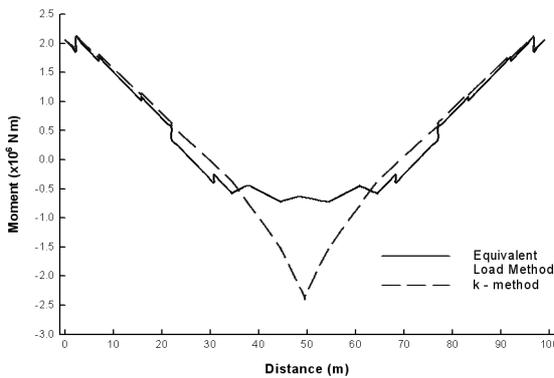


Fig. 16. Moment due to Shrinkage

k-factor법을 활용하여 콘크리트 크리프에 의한 응력을 산정하면 강재의 응력을 과소평가하게 되고, 응력의 방향을 반대로 평가한다. 건조수축의 경우 응력의 방향은 등가하중법과 k-factor법이 동일하지만, 단면변화에 따른 응력분포형상이 크게 차이가 난다.

이러한 부정정력에 의한 응력이 전체 구조물의 설계에서 큰 비중을 차지하지는 않지만, 합리적인 설계를 위해서는 개선이 필요하다.

4. 개선된 설계방법 연구

4.1 k-factor법 분석 및 개선설계법 제시

4.1.1 크리프에 의한 부정정력 계산

앞서 기술한 바와 같이, 크리프에 의한 영향을 계산함에 있어 k-factor법은 외적 부정정 요인 및 단면변화의 요인이 모두 반영된 값인 합성후 고정하중에 의한 응력에 비례하여 크리프에 의한 단면력(내적 부정정력)을 산정하고, 여기에 외적 부정정 요인을 고려한 값인 k-factor를 다시 한번 곱하여 단면력과 응력을 산정하므로 내적 부정정력에 의한 값을 왜곡시킬 뿐만 아니라 부모멘트가 발생하는 단면에 대해서는 단면부호를 바꾸어 정모멘트가 발생하

도록 하는 오류를 나타내고 있다.

따라서 k-factor를 곱하기 전의 값이 크리프에 의한 단면력과 응력을 실제와 가깝게 산정한다는 것을 예측할 수 있다.

그러므로 크리프에 대한 부정정력을 계산할 때는 식(5)와 같이 외적 부정정에 대해서 추가로 계산하지 않아도 된다는 결론을 얻을 수 있다.

바닥판 콘크리트

$$\Delta f_c = \frac{1}{n_1} \left[\frac{P_\phi}{A_{v1}} + \frac{M_\phi y_{v1}}{I_{v1}} \right] - E_{c1} \frac{f_c}{E_c} \phi_1 \quad \text{식 (5a)}$$

강재거더

$$\Delta f_s = \frac{P_\phi}{A_{v1}} + \frac{M_\phi y_{v1}}{I_{v1}} \quad \text{식 (5b)}$$

4.1.2 건조수축(온도차)에 의한 부정정력 계산

k-factor법에서는 모든 위치에서 단면이 동일한 것으로 가정하기 때문에 단면변화가 클수록 오차도 크다. 이러한 점을 개선하려면, 단면위치별로 발생하는 단면도심에서 바닥판까지의 거리변화를 반영할 수 있어야 한다. 따라서 단면위치별로 발생하는 거리 변화의 기준위치가 중요한데, 이를 전체단면의 평균도심으로 산정한 방법이 j-factor법이다.

j-factor법에서는 k-factor법과 동일한 방법으로 계산을 수행하되, k-factor를 보완하여 전체교량의 평균거리로부터 상대변화를 고려한 값을 j-factor로 정의함으로써 교량단면변화를 고려한다. 이를 식으로 표현하면 식 (6)과 같다.

$$j = k + \frac{d_{c2} - d_{aver}}{d_{aver}} \quad \text{식 (6)}$$

$$d_{aver} = \frac{\sum (d_{c2i} \times l_i)}{L}$$

k : k-factor

d_{c2} : 바닥판 중립축과 중립축과의 연직거리

d_{c2i} : 개별요소 i에서 d_{c2}

l_i : 개별요소 i의 길이, L : 교량전체 길이

바닥판 콘크리트

$$f_c = \frac{1}{n_2} \left[\frac{P_2}{A_{v2}} + \frac{j M_2 y_{v2}}{I_{v2}} \right] - E_{c2} \epsilon_s \quad \text{식 (7a)}$$

강재거더

$$f_s = \frac{P_2}{A_{v2}} + \frac{j M_2 y_{v2}}{I_{v2}} \quad \text{식 (7b)}$$

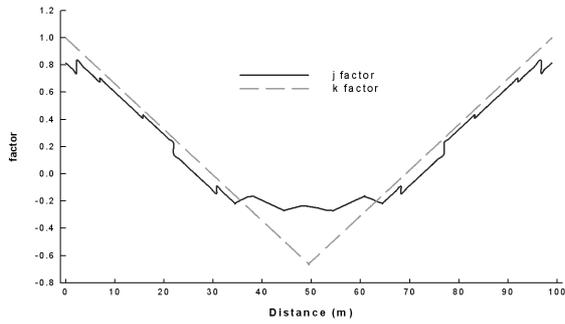


Fig. 17. k-factor & j-factor

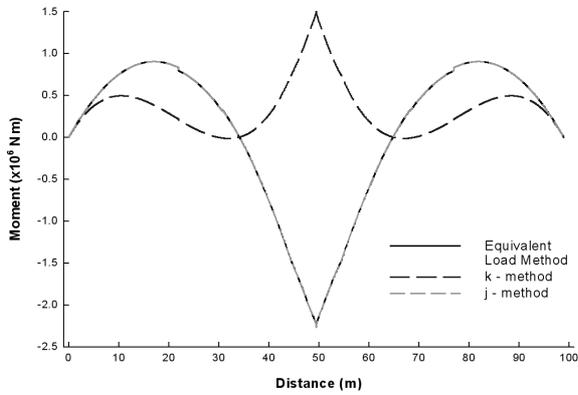


Fig. 18. Moment due to Creep

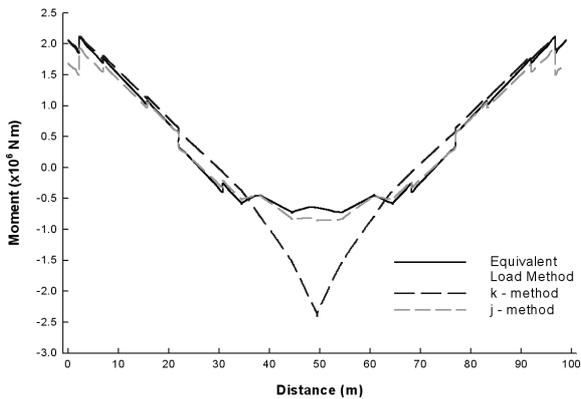


Fig. 19. Moment due to Shrinkage

j-factor법에 의한 계산을 위해 k 값은 k-factor법과 동일한 방법으로 적용할 수 있으며, 구조해석모델을 위한 단면정수 산정시 모든 단면에 대한 d_{c2} 값은 쉽게 산정할 수 있으므로 k-factor법과 비교하여 설계에 적용하는 것이 어렵지 않다.

예제에서의 d_{aver} 가 829.426mm로 계산되었다.

4.2 개선설계법의 평가

개선설계법은 k-factor법과 동일한 단계를 통해 설계를 할 수

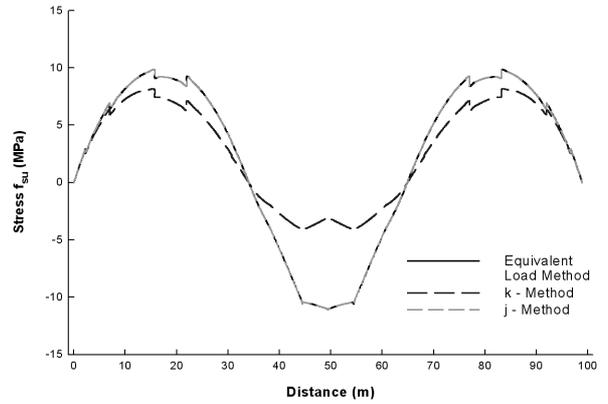


Fig. 20. Upper Flange Stress of Creep

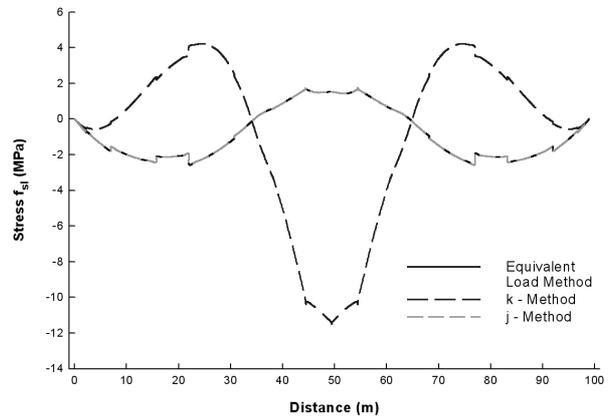


Fig. 21. Lower Flange Stress of Creep

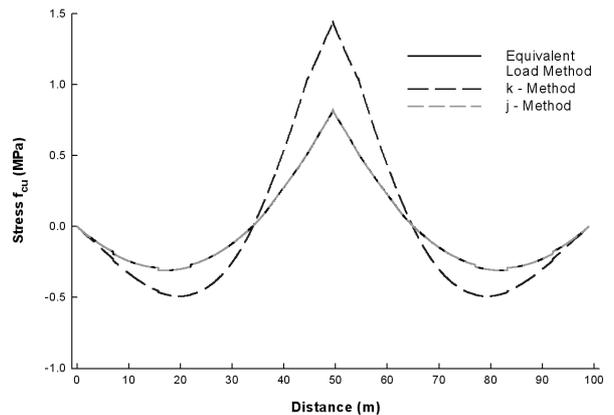


Fig. 22. Deck Stress(Top) of Creep

있기 때문에, 설계에 적용하기에 매우 편리할 뿐만 아니라, k-factor법보다 정확도가 높아지는 부정정력 설계법이다. 단면의 중립축으로부터 콘크리트 중립축까지 연직거리의 평균값 혹은 중간값을 산정하여야 하는 점은 있으나, 이러한 값은 합성후 하중을 산정하기 위한 해석모델 수립 단계에서 쉽게 계산해 낼 수 있다.

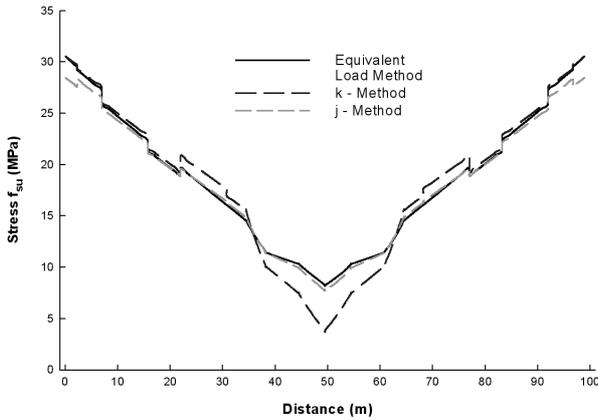


Fig. 23. Upper Flange Stress of Shrinkage

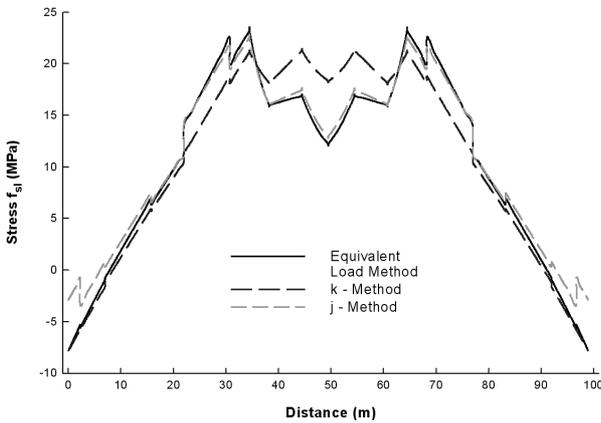


Fig. 24. Lower Flange Stress of Shrinkage

Fig. 17은 2경간 연속교에 대한 k-factor와 j-factor를 비교한 것으로 단순한 형태의 k-factor와 달리 j-factor는 단면이 변화되는 영향을 잘 반영하고 있다.

등가하중법, 개선설계법(j-factor법), k-factor법에 대하여 각각의 단면력을 비교하면 등가하중법과 개선설계법의 결과는 유사하지만, 요소내의 단면력 변화를 선형으로 가정한 것 등에 의해 작은 차이가 있다. 반면 k-factor법과는 차이가 크게 나타났다.

5. 결론

현재 합성형 교량의 설계에 있어서 부정정력의 산정 시에 외적 부정정에 의한 영향을 고려하기 위해 통상적으로 적용되고 있는 k-factor법과 부정정력의 영향을 산정하는 기본개념에 충실한 방법인 등가하중법을 설계예제에 적용하여 비교분석하였다.

비교분석 결과 k-factor법은 크리프의 영향을 산정함에 있어서는

외적 부정정 효과를 2번 고려하게 되기 때문에 정확도가 낮고, 건조수축의 영향을 산정함에 있어서는 단면변화의 효과를 고려하지 못하여 오차가 발생하는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 크리프의 영향을 고려함에 있어서는 합성후 고정 하중의 응력을 계산할 때 외적 부정정 요인이 이미 반영되므로 별도의 추가단계 없이 최종적인 부정정 응력을 산정하고, 건조수축의 계산에서는 단면변화의 영향을 고려하기 위하여 전체단면의 평균값으로부터 개별 단면의 상대차이를 반영하여 j-factor를 활용하는 개선설계법(j-factor법)을 제시하였다.

예제를 통하여 분석한 결과, k-factor법에 의한 크리프에 의한 응력은 정(+), 부(-)가 뒤바뀌는 결과를 보일 뿐만 아니라 30%이상의 오차가 발생하였으나 개선설계법은 오차가 작은 것을 확인하였다.

건조수축에 의한 응력을 비교하면 k-factor법에서는 최대 54%의 오차율이 발생하나, 개선설계법을 적용하는 경우 2.92%까지 개선시킬 수 있으며, 전장에 걸쳐 응력의 분포경향 또한 거의 일치하여 위치에 따른 단면의 변화를 충분히 고려하는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(10기술혁신A04)에 의해 수행되었습니다.

References

Edward G. Nawy (1996). *Prestressed Concrete*, Prentice-Hall, Inc.
 Gee, Goo Sam (2012). *A study on creep & shrinkage stress in composite bridges*. Master Thesis, Hanyang University (in Korean).
 GHALI, A., FAVRE, R., and ELBADRY, M. (2002). *Concrete Structures Stresses and Deformations - Third Edition*. Spon Press.
 Go, Sang Eun (2000). *Long-term behaviour of prestressed composite beams*, Master Thesis, Hanyang University (in Korean).
 KSCE (2003). "Standards and Explanations for Road Bridge Design" (in Korean).
 Lee, Jong Deuk (1999). *Stress and Deformation of Concrete Structure*, IlGwang (in Korean).
 Lee, Pil Goo (2008). *Evaluation for Creep and Shrinkage Losses of Prestressed Steel-Concrete Composite Girders*. Ph.D Thesis, Seoul National University (in Korean).
 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs of South Korea (2008). "Road Design Manual, Chapter 5. Bridge" (in Korean).
 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs of South Korea (2010). "Standards for Road Bridge Design" (in Korean).