

시공단계를 고려한 MSS 공법 교량의 시간의존적 거동해석

Time Dependent Analysis Considering the Construction Sequences in Bridges of Movable Scaffolding System (MSS)

곽 효 경* 손 제 국**
Kwak, Hyo-Gyoung Son, Je-Kuk

ABSTRACT

Through time-dependent analyses of RC bridges constructed by a movable scaffolding system (MSS) considering the construction sequence and creep deformation of concrete, structural responses related to the member forces are reviewed. On the basis of the compatibility condition and equilibrium equation at every construction stage, basic equations that can describe the moment variation with time in movable scaffolding construction are derived. By using the introduced relations, the design moment and its variation over time can easily be obtained with only the elastic analysis results and without additional time-dependent analyses considering the construction sequences. In addition, the design moments determined by the introduced equations are compared with the results from a rigorous numerical analysis with the objective of establishing the relative efficiencies of the introduced equations.

1. 서 론

MSS 공법은 기계화된 비계와 거푸집을 사용하므로 신속 시공이 가능하고 상대적으로 시공 시 안전성을 증가시키며 교량의 하부조건에 관계없이 시공할 수 있는 등의 많은 장점을 가진 교량 가설공법이다. 그러나 MSS 공법은 콘크리트의 재료적 특성으로 인한 크리프 등의 시간 의존적 거동을 가지게 되며, 시공단계에 따른 각 경간의 부재력과 처짐의 변화가 상대적으로 크게 나타나게 된다. 따라서 정밀 시공을 통한 구조물의 사용성과 저항력 확보를 위해 시공단계를 고려한 장기거동 해석이 요구된다. 그러나 콘크리트 교량의 시공단계에 따른 시간 의존적 거동해석을 위해서는 전용해석 프로그램을^{(2), (3)} 사용해야 하는데, 이는 작업의 복잡성과 실제 해석상의 어려움으로 인해 구조물의 설계와 해석 시 널리 사용되기에는 많은 제약이 따르게 된다. 따라서 실무에서 초기 단면 결정을 위해 보다 합리적이고 간편하게 장기거동을 고려한 설계 부재력을 결정하는 방안이 필요하게 된다.

따라서 이 논문에서는 각 시공단계별 시간의존적 거동을 사하중과 긴장재의 긴장력에 대하여 수치해석을 통해 분석하여, 나아가 각 경간이 경험하는 부재력의 변화를 토대로 부재력 산정 관계식을 제안하고자 한다.

* 한국과학기술원 토목공학과 부교수

** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

2. MSS 공법에 의한 시공단계해석

2.1 시공단계

MSS공법은 상부구조 시공 중 거푸집이 부착된 특수한 이동식 지보를 이용하여 한 경간씩 순차적으로 시공하여 구조계를 완성하게 되므로 시공 방법의 특성상 구조계의 변화에 따른 부재력과 처짐의 증가 또는 감소가 반복적으로 나타나게 된다. 따라서 MSS공법에 의해 건설되는 교량의 시공단계 해석을 위해 예제 구조물은 지간 길이가 30m인 5경간 연속교로 표 1과 2에서 보는 바와 같이 단면과 재료 물성치를 가정하였다. 그리고 콘크리트의 극한 크리프 계수 $C_u = 2.35$ 를 사용하였으며, ACI모형을 토대로 한 시간 의존적 거동해석을 수행하였다⁽¹⁾.

Table 1. Material and Sectional Properties Used in Application

Representative Section Properties		Material Properties	
	w_D	26.65 t/m	
	f'_c	400 kg/cm ²	
	f_{sy}	4000 kg/cm ²	
	E_s	2.1×10^6 kg/cm ²	

Table 2. Tendon Properties Used in Application

P_i	A_p	f_{pv}
117ton	10 cm ²	14765kg/cm ²

MSS공법의 시공단계는 그림 1에서 나타낸 바와 같이 콘크리트의 타설 기간을 10일로 가정하였다. 먼저 그림 1의 (가)에서 첫 번째 경간에 비계를 설치하며, (나)에서 10일째 콘크리트를 타설하여 10일 동안 콘크리트 양생기간을 가지며, (다)에서 21일째 비계를 두 번째 경간으로 이동한다. 이때 제 1경간에 타설된 콘크리트가 구조체로 작용하게 되며 구조계에는 사하중 w_D 로 영향을 미치게 된다. 또한 제 2경간의 콘크리트 타설을 위해 이동한 비계의 자중이 집중하중(P_g)으로 작용하게 된다. 나아가 (라)에서 볼 수 있는 바와 같이 30일째 제 2경간의 콘크리트가 타설되면 비계의 자중(P_g)과 더불어 타설된 콘크리트 자중이 제 1경간에 집중하중(P_c)으로 작용하게 된다. 그림 1의 (마) ~ (카)에서 보는 바와 같이 세 번째 이상의 경간에서 작용하게 되는 하중은 두 번째 경간에서의 하중 작용과 동일한 단계를 거치게 되며 마지막 다섯 번째 경간은 101일째 완공된다. 특히 그림 2에서 보는 바와 같이 비계와 콘크리트 타설 중의 집중하중 P_g 와 P_c 는 교각을 중심으로 한 모멘트 평형 관계식을 토대로 다음의 식으로 유도되며 $L=30m$, $l_0=2.5m$, $l_1=27m$, $l_2=3m$, $l_3=27.5m$, $l_4=6m$ 로 가정한다면 식 (1)에 의해 $P_g=179.4tonf$, $P_c=348.9tonf$ 으로 계산된다.

$$P_g = w_g (l_3^2 - l_4^2) / (2l_3), \quad P_c = w_D (l_3^2 - l_4^2) / (2l_3) \quad (1)$$

여기서 $w_g = 13.7tonf/m$ 로서 비계의 자중을 의미한다.

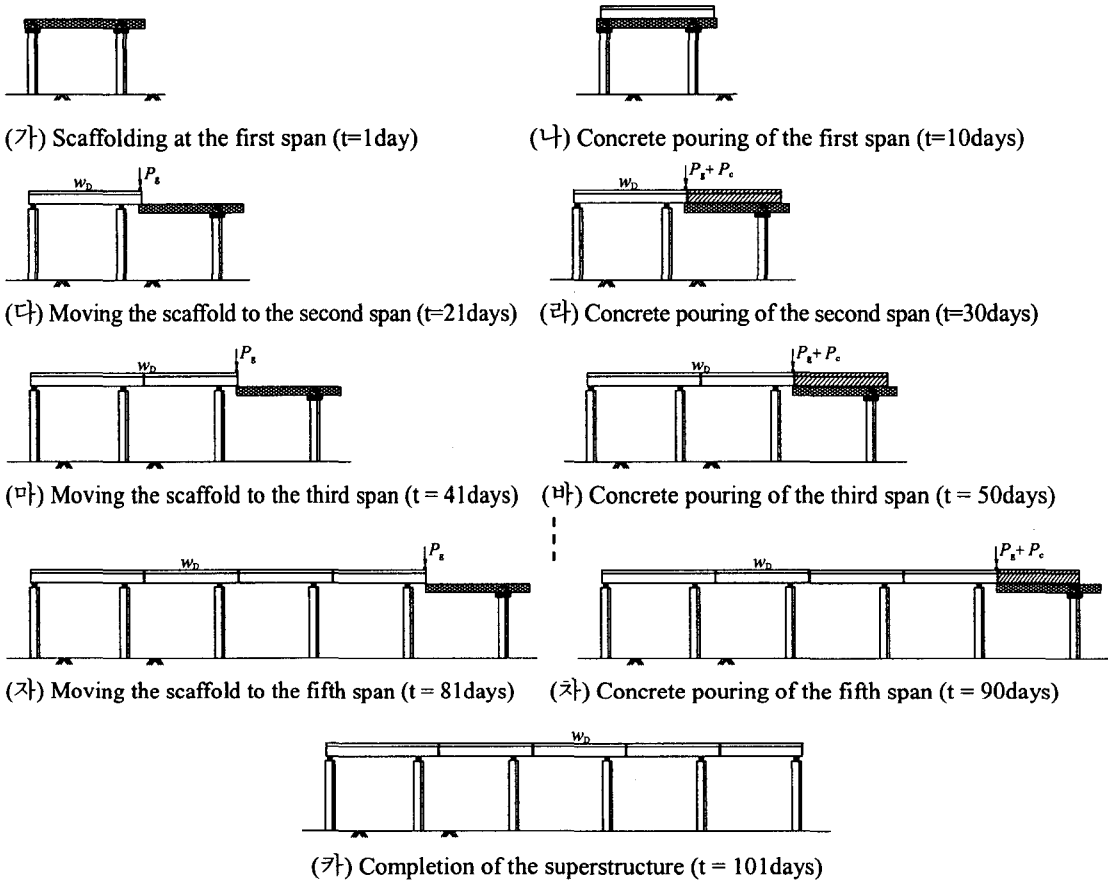


그림 1. Construction Sequences in a Bridge Constructed by MSS

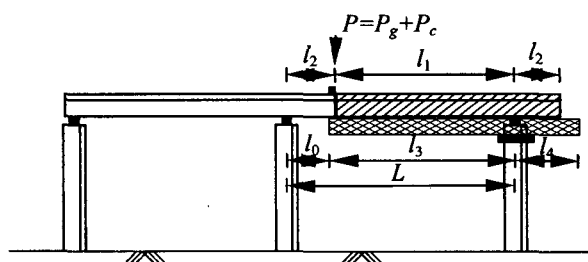


그림 2. 타설 중 비계와 콘크리트의 하중관계

2.2 사하중에 의한 부재력 변화

그림 1에서 기술한 시공단계를 토대로 각 단계별 부재력을 살펴보면 그림 3의 (가)에서 보는 바와 같이 첫 번째 경간 콘크리트의 타설 후 사하중과 두 번째 경간으로 이동한 비계에 의해 전달되는 집중하중 P_g 가 작용하는 21일 시점(그림 1 (다) 참조)과 두 번째 경간에 콘크리트가 타설되어 추가되는 집중하중 P_g 가 작용하는 30일 시점(그림 1 (라) 참조)에서는 단경간의 구조거동을 나타내므로 부재력의 분포가 시간에 따라 변화하지 않게 된다. 나아가 그림 3의 (나), (다)에서도 각 경간이 순차적으로 연속화될 때 사하중과 집중하중 P_g 와 P_c 가 작용되어 각 지간의 부재력 분포가 증가

와 감소를 지속적으로 반복하게 되는 것을 알 수 있다. 또한 그림 3의 (다)에서 볼 수 있는 바와 같이 MSS공법에 의한 시공단계별 시간의존적 거동 해석을 통해 산정된 부재력 분포와 구조계의 변화 없이 $t = 0$ 일 시점에 일체시공에 의한 연속구조물이 이루어 진다고 가정한 완성된 구조계를 토대로 계산된 부재력 분포(그림 3 (다)의 TS)와 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 각 경간이 연속화할 때 비계와 콘크리트 사하중의 작용에 대한 집중하중 P_g 와 P_c 의 작용으로 내부 변형에 의한 모멘트의 크기를 변화시키므로 연속화에 의한 부정정 구조계와 일체 시공에 의한 정정 구조계의 탄성모멘트 차이가 크지 않게 됨을 알 수 있다.

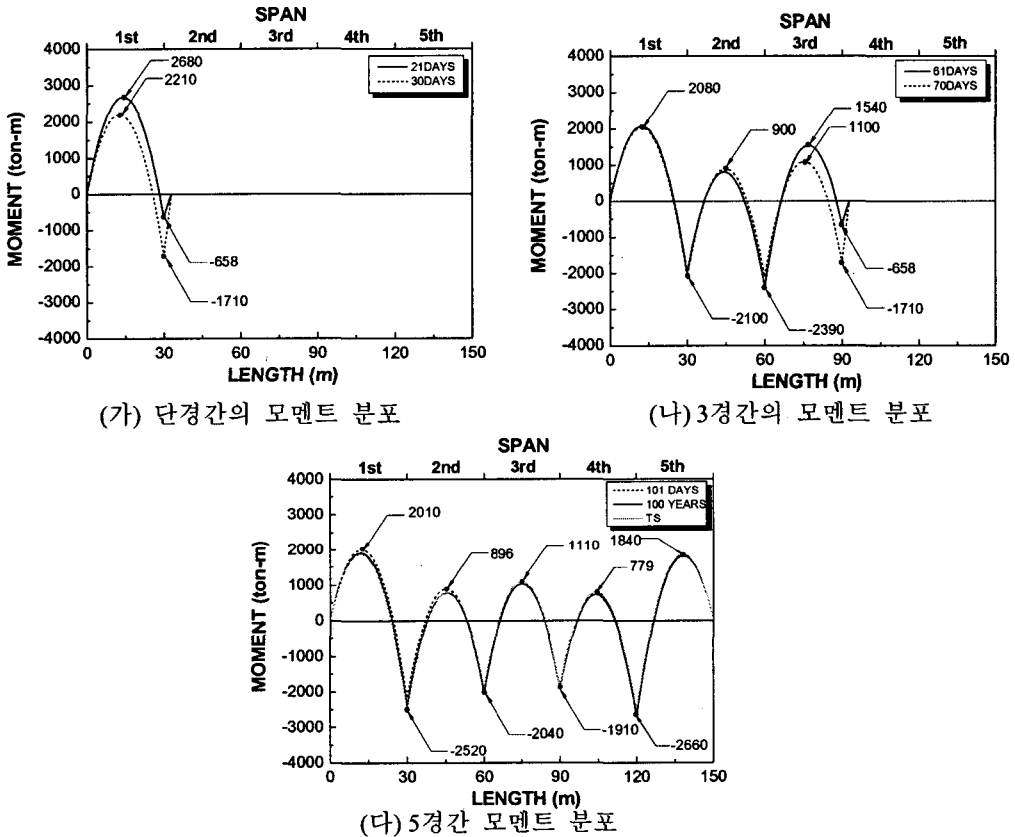


그림 3. MSS공법의 시공단계별 사하중 모멘트

2.3 긴장력에 의한 부재력 변화

5 경간 연속 구조물에 대한 종방향 긴장재는 실제 가설된 고속철도 교량 도면을 토대로 그림 8에서 보는 바와 같이 가운데 경간을 중심으로 좌우대칭의 포물선 형태로 배치하였으며 각 경간의 중심에서 편심은 159.6cm, 각 내측지점에서 편심은 35.4cm, 그리고 각 내측지점에서 3m 떨어진 곳에서 변곡점을 가지며 변곡점의 편심은 3.6cm인 것으로 설정하였다. 그리고 이 논문에서 사용한 긴장재의 재료와 단면의 물성치는 표 2에서 명시하였다. 또한 긴장재의 시간에 따른 응력이완(Relaxation)은 Magura 등⁽⁹⁾에 의해 제안된 방법을 고려하였다.

설정된 긴장재의 시공단계는 그림 2에서 설명한 각 경간이 구조거동을 하는 시기인 21일, 41일, 61일, 81일과 101일에 각 지간에 대응하는 긴장재에 긴장력을 작용시키게 된다. 그림 5의 (가)에서

보는 바와 같이 21일 때 첫 번째 경간에 긴장력을 작용한 후 40일 때까지 응력이완에 따른 값의 변화가 나타남을 알 수 있다. 그리고 두 번째 경간의 타설 후 41일에 긴장력이 작용한 후 편심에 의한 중앙 경간의 부모멘트는 모멘트 감소가 나타나게 되는 반면 지점부의 정모멘트는 상대적으로 작게 변화함을 알 수 있다. 따라서 긴장재의 장력에 따른 시공단계별 시간의존적 거동에 대한 부재력 변화는 각 경간의 시공단계에서 중앙 경간의 부모멘트는 감소하고 지점부의 정모멘트는 거의 변화가 없는 부재력 변화를 보이며, 각 경간이 연속화 하는 동안 부재력의 증가와 감소가 지속적으로 변화하는 것을 알 수 있다.

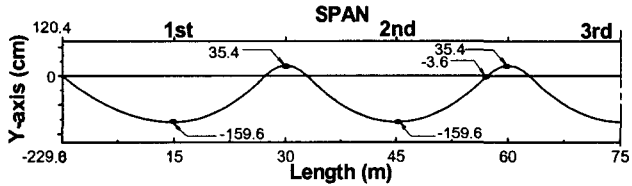
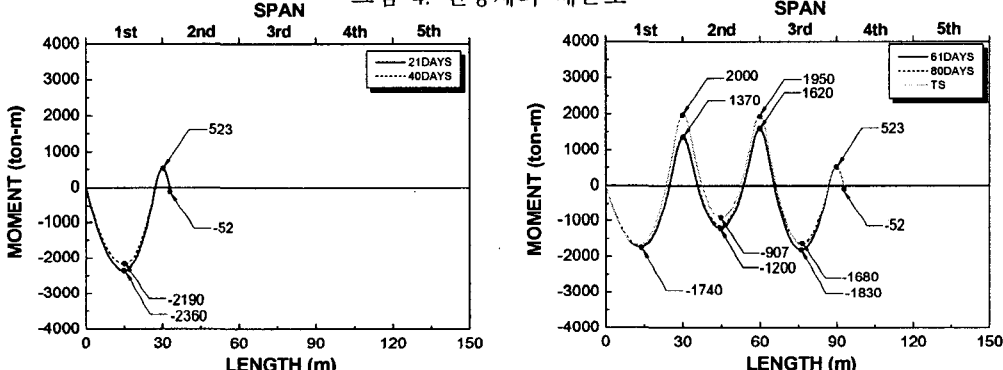
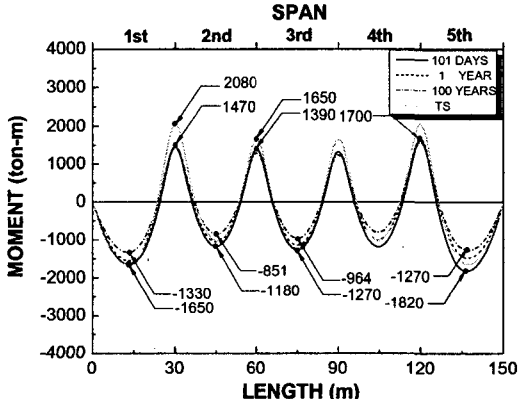


그림 4. 긴장재의 배근도



(가) 단경간의 모멘트 분포

(나) 3경간의 모멘트 분포



(다) 5경간 모멘트 분포

그림 5. MSS공법의 시공단계별 긴장력에 의한 모멘트

또한 시공단계별 일체시공에 의한 TS와 시공단계별 시간의존적 거동의 부재력이 차이를 가지는 것을 알 수 있다. 이는 정정 구조계에서 부정정 구조계로의 변화에 따른 시공단계에 대한 구조계 변형의 영향과 상대적으로 작은 크리프 변형, 그리고 긴장재의 응력손실에 의한 긴장력의 감소에

대한 부재력 차이로 생각할 수 있다. 따라서 크리프에 의한 모멘트 재분배는 시간에 따라 정모멘트의 증가로 나타나게 되므로, 전체 부재력 변화가 TS에 가까워지려는 즉, 지간 중앙의 부모멘트 부분은 감소하고 지점부의 정모멘트 부분은 증가한다⁽⁴⁾. 또한 긴장재의 응력이완에 따른 긴장력 감소로 인해 정모멘트와 부모멘트의 전체적인 부재력 감소가 발생한다. 따라서 크리프와 긴장재의 응력이완으로 인한 부재력의 변화는 지간 중앙의 부모멘트 부분의 부재력은 전체적으로 감소하고 지점부 정모멘트 부분의 부재력은 크리프와 긴장재의 응력이완에 따른 부재력의 상쇄로 인해 변화가 거의 없게 됨을 알 수 있다.

3. 긴장재의 설계모멘트 관계식

3.1 설계모멘트 관계식 결정

MSS공법에 의해 시공되는 교량의 시간의존적 부재력을 산정하기 위해, Trost와 Wolff는⁽⁶⁾ 각 시공단계별 탄성모멘트 조합 $\sum M_{S,i}$ 와 전체 교량의 일체시공으로 인해 시공 중 구조계 변화가 없어 크리프 모멘트가 추가적으로 발생하지 않는 전체 구조계의 탄성 모멘트 M_E 와의 관계를 토대로 MSS공법으로 시공되는 교량의 시간에 따른 모멘트 변화를 산정하고 있다. 그러나 이 관계식은 시공단계별 구조계의 변화에 따른 크리프 변형에 대한 모멘트 재분배의 영향을 고려하지 못하는 한계가 있다.

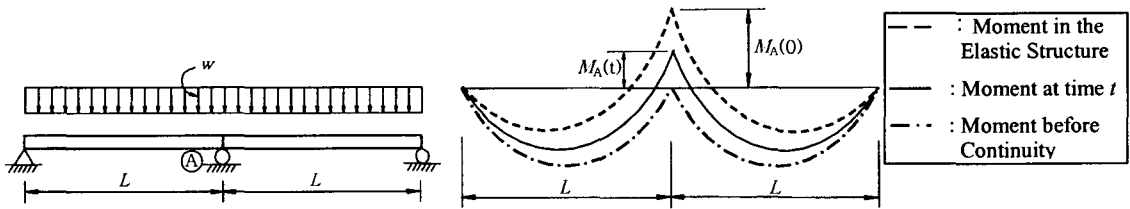
$$M_T = \sum M_{S,i} + (M_E - \sum M_{S,i}) \frac{\phi_t}{1 + \rho \phi_t} \quad (2)$$

여기서 ϕ_t 는 t일 때의 크리프 계수이고 ρ 는 이완계수(relaxation factor)이다.

이러한 문제점을 해결하고, 시간의존적인 긴장재의 부재력을 효과적으로 모사하기 위해 이 논문에서는 MSS공법을 시공단계와 긴장재의 응력이완을 토대로 개선된 방법을 제안하고자한다. 그림 6의 (가)에서 보는 바와 같이 두 개의 단순보가 $t=t_1$ 에 연결이 된다면, 지점 A에서의 시간에 따른 모멘트는 회전조건에 따라 결정될 것이다. 즉, 내측지점에서의 모멘트 다음과 같이 주어질 수 있다⁽⁴⁾.

$$M_A(t) = M_A(0) \cdot \frac{\phi(t, t_0) - \phi(t_1, t_0)}{1 + \chi \phi(t, t_1)} \quad (3)$$

여기서 $M_A(0)$ 은 $t=0$ 일에 모든 경간이 시공될 때의 탄성모멘트를 의미한다. 그리고 ϕ 는 크리프 계수, χ 는 재령계수이다.



(가) 두 경간의 연속화

(나) 시간에 따른 모멘트 분포

그림 6. MSS 공법의 시간의존적 거동 모사

따라서 이 논문에서는 앞에서 살펴본 두 경간의 연속화에 의한 변위와 하중의 관계를 토대로 시간에 따른 모멘트 변화를 반영하는 동시에 Trost와 Wolff(1970)에 의해 제안된 교량 구조물의 가설단계 모사식의 기본형태를 도입하여 MSS공법의 시공단계에 따른 임의의 시간에서의 모멘트를 탄성해석 결과를 토대로 산정할 수 있는 보다 개선된 관계식 (4)를 제안하고자 한다. 이 식에서 살펴볼 수 있는 바와 같이, 우측의 첫 번째 항은 시공단계에 따른 탄성 모멘트의 크기를 나타내며, 두 번째 항은 전체 구조계의 모멘트와 시공단계에 따른 탄성 모멘트의 부재력 차이에 의한 크리프 영향을 모사하고 있다. 그리고 각 항에 $R(t)$ 를 적용하여 응력 손실의 영향을 고려하였다. 특히 경간의 연속화에 따른 크리프와 재령 차이에 의한 거동을 모사하기 위하여 식 (3)에서 살펴본 바와 같이 MSS공법에 의해 가설되는 교량의 지점부 모멘트 변화를 나타내는 $(\phi(t, t_0) - \phi(t_1, t_0)) / (1 + \chi \phi(t, t_1))$ 의 항이 반영되어 있음을 알 수 있다.

$$M_T = \sum M_{s,i} \cdot R(t) + (M_E - \sum M_{s,i}) \cdot R(t) \cdot \frac{\phi(t, t_0) - \phi(t_1, t_0)}{1 + \chi \phi(t, t_1)} \quad (4)$$

여기서 $R(t) = f_s / f_{si} = 1 - \log t / 10 \cdot (f_{si} / f_y - 0.55)$ 로서 긴장재의 응력이완에 대한 영향을 고려하고 있다. 그리고 f_s 는 시간 t 에서의 응력, f_{si} 는 초기 응력으로 $f_{si} = P_i / A_p = 13910 \text{ kgf/cm}^2$, 그리고 f_y 는 0.001 오프셋 항복응력이다.

3.2 제안된 관계식의 적용

제안된 관계식의 타당성을 검증하기 위해 각 경간에서의 t , t_0 와 t_1 을 가정하면 100년 경과 시점에서 콘크리트 재령은 첫 번째 경간에서 $t = 36490$ 일, 두 번째 경간에서 $t = 36470$ 일, 세 번째 경간에서 $t = 36450$ 일, 네 번째 경간에서 $t = 36430$ 일, 다섯 번째 경간에서 $t = 36410$ 일이 된다. 그리고 각 경간의 콘크리트에서 크리프 변형이 발생되기 시작하는 시간 t_0 는 모두 기준일인 10일이 된다. 또한 부정정 구조물이 되는 시간 t_1 은 첫 번째 경간에서 $t_1 = 30$ 일이 되며 나머지 경간은 연속화가 되는 시점에서 부정정 구조물이 되므로 $t_1 = 10$ 일이 된다. 동일한 방법으로 설정된 101일, 1년, 10년, 100년의 경과 시점에서 식 (4)에 의한 결과와 수치해석을 통한 정밀해석 결과를 그림 15에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 제안식 (4)에 의한 M_T 의 결과가 수치해석을 통한 정밀해석 (Creep Analysis) 결과를 효과적으로 모사하고 있으며 또한 현재 널리 사용되고 있는 Trost와 Wolff에 의해 제안된 식 (식 (2) 참조)은 상대적으로 정, 부모멘트 값을 더 크게 예측하고 있음을 알 수 있다. 이는 Trost와 Wolff에 의해 제안된 식 (2)는 콘크리트 재령만을 고려하여 정밀해석결과와 차이가 크게 나타나지만, 본 논문에서 제안한 식(4)에 의한 부재력 변화의 결과는 각 콘크리트의 재령 차이뿐만 아니라 구조계의 변화에 따른 크리프 변형에 의한 모멘트 재분배의 영향을 함께 고려하여 수치해석을 통한 정밀해석 결과를 보다 더 효과적으로 모사하고 있음을 판단할 수 있다.

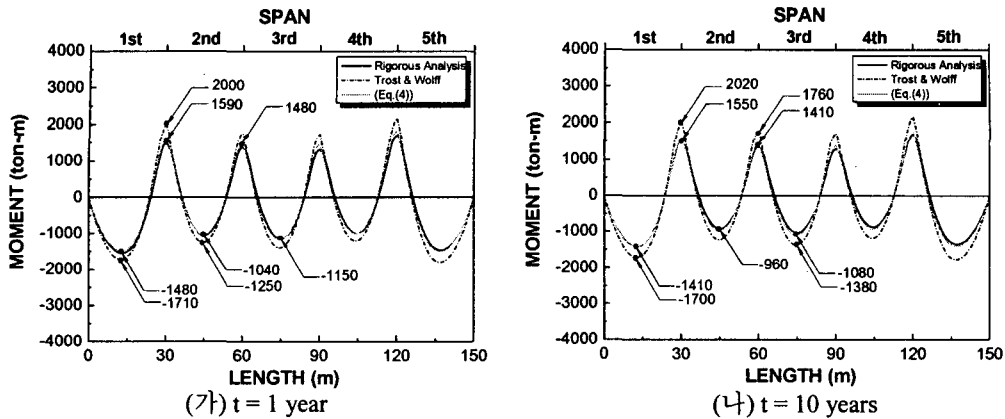


그림 8. MSS공법에 의한 긴장재 부재력 분포

3. 결론

이 논문에서는 MSS 공법에 의한 교량을 시공단계별 시간의존적 거동에 영향을 주는 사하중과 긴장재의 긴장력에 의한 부재력을 각각 살펴 보았으며 또한 사하중의 경우 일체시공에 의한 TS를 토대로, 그리고 긴장재의 긴장력의 경우 수치해석상의 복잡한 과정을 거치지 않고 각 시공단계별 탄성 모멘트 해석에 의한 관계식의 제안으로 각각 시공단계별 시간의존적 거동을 모사할 수 있도록 하였다.

감사의 글

본 연구는 한국 과학재단 지정 우수 연구센터인 SMART 사회기반시설 연구센터(SISTEC)의 연구비 지원에 의해 이루어졌음을 밝히며 이 지원에 대하여 깊이 감사 드립니다.

참고문헌

1. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures," (ACI 209R-92), American Concrete Institute Detroit, 1997.
2. Heinz, P. "RM-Spaceframe Static Analysis of SPACEFRAME," TDA-technische Datenverarbeitung Ges.m.b.H., 1997.
3. Kang, Y.J. "SPCFRAME-Computer Program for Nonlinear Segmental Analysis of Planar Prestressed Concrete Frames, Report No. UCB/SEMM 89/07, UNIV. of California, Berkeley, 1989.
4. Neville, A.M., Dilger, W.H. and Brooks, J.J., "Creep of Plain and Structural Concrete," Construction Press, London and New York, 1983.
5. Magura, D.D., Sozen, M.A. and Siess, C.P. (1964) A Study of Stress Relaxation in Prestressing Reinforcement, *Journal of PCI*, Vol.9, No.2. pp. 13-57.
6. Trost, H. and Wolff, H.J. "Zur Wirklichkeitsnahen Ermittlung der Beanspruchungen in Abschnittsweise Hergestellten Spannbeton-ragwerken," *Bauingenieur* 5, 1970.