

콘크리트의 초기재령특성을 고려한 합성형 휨 부재의 유한요소 거동해석

Finite Element Analysis of Flexural Composite Members Considering Early-Age Concrete Properties

강병수*
Kang, Byung Soo

주영태*
Ju, Young Tae

신동훈*
Shin, Dong Hun

이용학**
Lee, Yong Hak

ABSTRACT

A finite element formulation to predict the flexural behavior of composite girder is presented in which the early-age properties of concrete are specified including maturing of elastic modulus, creep and shrinkage. The time dependent constitutive relation accounting for the early-age concrete properties is derived in an incremental format by expanding the total form of stress-strain relation by the first order Taylor series with respect to the reference time. The total potential energy of the flexural composite member is minimized to derive the time dependent finite element equilibrium equation. Numerical applications are made for the 3-span double composite steel box girders which is a composite bridge girder filled with concrete at the bottom of the steel box in the negative moment region. The numerical analysis with considering the variation of concrete elastic modulus are performed to investigate the effect of it on the early-age behavior of composite structures. The one dimensional finite element analysis results are compared with the analytical method based on the sectional analysis. Close agreement is observed among the two methods.

1. 서론

콘크리트의 건조수축과 크리프 현상 및 탄성계수의 발현은 경화에 의해 진행되는 재령 종속적 재료 특성으로서 콘크리트 구조물의 장기거동의 주요 원인이 된다. 콘크리트 구조물의 장기거동 해석에 관한 연구는 건조수축과 크리프 현상을 고려하는 범주에서 수행되어 왔으며 이에 관련한 대부분의 연구는 Bazant에 의해 제안된 재령종속적 보정 탄성계수를 이용하고 있다 (Ghali (1986), Bradford (1991), Jendele 등 (1992), Gilbert 등 (1995), Chiu 등 (1996), Kwak 등 (2000)). 재령 종속적 보정탄성계수를 사용한 수식화 결과는 매우 간단한 결과로 표현되나 재령종속적 보정탄성계수가 갖는 원천적 의미의 복잡성과 구성하는 각 계수의 수치해석적 복잡성 및 계수 사용 값에 따른 수치해석 결과의 변동은 개선되어야 할 점으로 인식된다.

본 연구에서는 콘크리트의 비역학적 및 역학적 재료특성을 고려하여 휨을 받는 합성형 거더의 시간 종속적 거동해석을 수행하기 위한 증분유한요소해석법의 정식화를 유도하였으며, 제안된 해석방법에 근거하여 부모멘트 구간의 강박스 하단에 콘크리트를 타설한 이중합성 박스 거더의 재령 종속적 거동해석을 수행하였다.

* 정회원, 건국대학교 토목공학과 대학원

** 정회원, 건국대학교 토목공학과 교수

2. 응력-변형률의 증분관계

콘크리트의 비역학적 및 역학적 재료성질을 고려한 증분구성관계를 Taylor 급수확장을 총 응력-변형률 관계에 적용하여 현재시간에 관해 선형적으로 확장함으로써 유도하였다. 여기에서 요구되는 총 응력-변형률의 관계는 콘크리트와 강재 및 철근으로 구성되는 강 합성 거더의 임의 단면에 발생하는 총 변형률을 비역학적 및 역학적 변형률로 분리하고 변형률 적합조건을 적용하여 유도하였다.

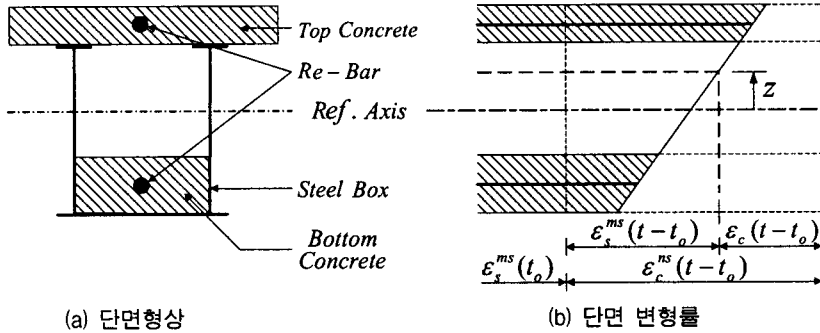


그림 1 강 합성 박스거더의 단면 변형률

그림 1은 콘크리트에 작용된 비역학적 변형으로 인해 강 합성 박스거더의 단면에 발생된 변형률을 보여준다. 그림에서 보여진 강 박스거더는 강 박스 하부에 콘크리트가 타설된 이중합성 구조로서 하부 콘크리트를 제거하면 일반적인 강 합성 박스거더 형태와 동일하다. 콘크리트의 건조수축 및 크리프 현상으로 인한 비역학적 변형은 콘크리트와 강재의 상호구속작용으로 인해 각각의 단면에 역학적 변형을 초래한다. 그림 1(b)에 보여진 바와 같이 t_0 에서 t 로의 시간변화 동안에 발생하는 콘크리트의 비역학적 변형률 $\epsilon_c^{ms}(t-t_0)$ 로 인해 강재와 콘크리트에는 각각 $\epsilon_s^{ms}(t-t_0)$ 와 $\epsilon_c(t-t_0)$ 의 역학적 변형률이 발생한다. 이때 현재시간 t 에서 강재 단면에 발생한 총 변형률 $\epsilon_s^{ms}(t)$ 을 단면깊이에 따른 일정변형률 $\epsilon_0(t)$ 과 곡률 $\phi(t)$ 로 분리하여 강재박스와 콘크리트 단면 및 철근에 발생하는 변형률을 표현하면 각각 다음과 같다.

$$\epsilon_b^{ms}(t) = \epsilon_0(t) + \phi(t)z, \quad \epsilon_c(t) = \epsilon_s^{ms}(t) - \epsilon_c^{ms}(t), \quad \epsilon_s^{ms}(t) = \epsilon_0(t) + \phi(t)z_{si} \quad (1)$$

여기서, z 와 z_{si} 는 기준축으로부터 단면깊이와 i 번째 철근의 깊이를 각각 나타낸다. 식 (1)의 비역학적 변형률 $\epsilon_c^{ms}(t) = \epsilon_{sh}(t) + \epsilon_{cr}(t)$ 이며 건조수축과 크리프 변형률은 KCI, ACI, 혹은 fip의 관계식을 사용한다. 또한, 역학적 변형률을 구성하는 성분은 건조수축과 크리프 및 하중작용으로서 $\epsilon_s^{ms}(t) = \epsilon_s^h(t) + \epsilon_s^{cr}(t) + \epsilon_s^d(t)$ 이 된다. 식 (1)의 변형률에 대응하는 각 단면의 응력을 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma_b(z, t) = E_b \epsilon_b^{ms}(z, t), \quad \sigma_c(z, t) = E_c(t) \epsilon_c(z, t), \quad \sigma_s(z, t) = E_s \epsilon_s^{ms}(z = z_{si}, t) \quad (2)$$

식 (2)을 현재시간 $t = t_n$ 에 관하여 Taylor의 급수확장을 이용하여 선형적으로 확장하면 강재박스와 콘크리트 단면 및 철근의 응력 증가율 $\dot{\sigma}_b, \dot{\sigma}_c, \dot{\sigma}_s$ 은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\sigma}_b = E_b \dot{\epsilon}_b^{ms}, \quad \dot{\sigma}_c = \left. \frac{\partial \sigma_c}{\partial E_c} \right|_{t=t_n} \dot{E}_c + \left. \frac{\partial \sigma_c}{\partial \epsilon_c} \right|_{t=t_n} \dot{\epsilon}_c, \quad \dot{\sigma}_s = E_s \dot{\epsilon}_s^{ms} \quad (3)$$

여기서, $(\partial \sigma_c / \partial E_c)_{t=t_n} = E_c(t = t_n)$ 이고, $(\partial \sigma_c / \partial \epsilon_c)_{t=t_n} = E_c(t = t_n)$ 이므로 콘크리트의 응력 증가율을 시간 $t = t_n$ 에서 t_{n+1} 까지의 유한시간 증분으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta \sigma_c = [E_c(t_{n+1}) - E_c(t_n)] \epsilon_c(t_n) + E_c(t_n) \Delta \epsilon_c \quad (4)$$

여기서, $\Delta \sigma_c = \sigma_{n+1} - \sigma_n$ 이다.

3. 유한요소 정식화

응력과 변형률의 관계가 비선형 관계인 경우에 구조물 거동해석은 미소증분을 고려하여 이 증분구

간 내에서 거동을 선형화하는 방법으로 수행된다. 콘크리트의 재령 종속적 비역학적 및 역학적 재료특성을 고려하는 경우에 있어서 응력과 변형률의 관계는 시간에 관한 비선형적 관계가 되므로 시간증분에 근거하는 증분 유한요소 해석의 정식화가 필요하게 된다. 본 논문에서는 강 합성 거더의 포텐셜 에너지를 유도하고 보 요소로 구조물 거동을 이상화하여 절점변위에 관해 포텐셜 에너지를 극소화함으로써 일반화된 시간 종속적 증분 유한요소 평형관계식을 유도하였다.

3.1 변형률과 변위 관계

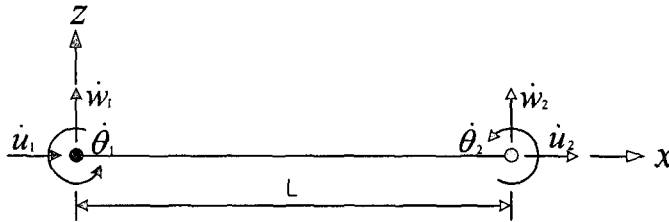


그림 2 보 요소에서의 절점 증분 변위 벡터

그림 2는 x 및 z 축을 따르는 절점 증분변위 \dot{u}, \dot{w} 와 증분회전각 $\dot{\theta}$ 의 자유도를 갖는 보요소를 보여준다. 부재의 임의 단면에서 평면보존의 법칙이 성립하는 것으로 가정할 때, 축 방향 증분변위 $\dot{u}(x, z)$ 를 축성분 $\dot{u}_o(x, z)$ 과 휨성분 $\dot{u}_b(x, z)$ 으로 분리하여 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{u}(x, z) = \dot{u}_o(x, z) + \dot{u}_b(x, z) = \dot{u}_o - \frac{d\dot{w}}{dx} z \quad (7)$$

단면상의 변형률증분 $\dot{\epsilon}(x, z)$ 는 식 (7)을 x 에 관한 미분을 통해 다음과 같이 계산한다.

$$\dot{\epsilon}(x, z) = \dot{\epsilon}_o + \dot{\phi}z = \frac{d\dot{u}_o}{dx} - \frac{d^2\dot{w}}{dx^2} z \quad (8)$$

식 (7)을 구성하는 두 독립변수 \dot{u}_o 와 \dot{w} 의 변위장은 Bar 요소 형상함수 N_o 와 보 요소 형상함수 N_b 을 사용하여 그림 2에서 나타낸 절점변위에 관하여 근사화하면 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{u} = N_o \dot{d}_o - z \frac{dN_b}{dx} \dot{d}_b = N \dot{d} \quad (9)$$

여기서 $\dot{u} = \{\dot{u}_o, \dot{w}\}^T$, $\dot{d}_o = \{\dot{u}_1, \dot{u}_2\}^T$, $\dot{d}_b = \{\dot{w}_1, \dot{\theta}_1, \dot{w}_2, \dot{\theta}_2\}^T$, $\dot{d} = \{\dot{d}_o, \dot{d}_b\}^T$ 이다. 식 (8)의 변형률 증분은 식 (9)를 사용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\epsilon}(t) = \dot{\epsilon}_o(t) + \dot{\phi}(t)z = B \dot{d} \quad (10)$$

여기서 $B = \{B_o, zB_b\}^T$, $B_o = dN_o/dx$, $B_b = -d^2N_b/dx^2$ 이다.

식 (9)와 (10)을 사용하여 콘크리트, 철근 및 강 박스 단면에 발생하는 변형률증분을 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon}_b(t) = \{B_o, zB_b\} \{\dot{d}_o, \dot{d}_b\}^T, \quad \dot{\epsilon}_c(t) = B \dot{d} - \dot{\epsilon}_{ms}(t), \quad \dot{\epsilon}_s(t) = \{B_o, zB_b\} \{\dot{d}_o, \dot{d}_b\}^T \quad (11)$$

3.2 요소 강성 매트릭스

시간 $t=t_n$ 에서 내적 증분 에너지는 강재, 콘크리트 및 철근에 축적된 증분 변형에너지의 합으로 구성된다. 식 (3)과 (11)을 이용하여 증분변형에너지를 계산하면 각각 다음과 같다.

강재에 저장된 에너지 : \dot{U}_b

$$\dot{U}_b = \frac{1}{2} \int_{V_b} \dot{\sigma}_b \dot{\epsilon}_b dV_b = \mathbf{d}^T \left\{ \int_0^L E_b \begin{bmatrix} A_b B_o^T B_o & G_b B_o^T B_b \\ G_b B_b^T B_o & I_b B_b^T B_b \end{bmatrix} dx \right\} \mathbf{d} \quad (12)$$

여기서 A_b 는 강재의 단면적이고 $G_b = \int_A x dA$ 이며, $I_b = \int_A x^2 dA$ 이다.

콘크리트에 저장된 에너지 : \dot{U}_c

$$\begin{aligned}
U_c &= \frac{1}{2} \int_{V_c} \dot{\sigma}_c \dot{\epsilon}_c dV_c - \frac{1}{2} \int_0^l \left\{ \sum_i (\dot{\sigma}_c \dot{\epsilon}_c)_{z=z_i} A_{si} \right\} dx \\
&= \mathbf{d}^T \left\{ \frac{1}{2} \int_0^l E_c \begin{bmatrix} (A_g - \sum_i A_{si}) \mathbf{B}_o^T \mathbf{B}_o & (G_g - \sum_i z_{si} A_{si}) \mathbf{B}_o^T \mathbf{B}_b \\ (G_g - \sum_i z_{si} A_{si}) \mathbf{B}_b^T \mathbf{B}_o & (I_g - \sum_i z_{si}^2 A_{si}) \mathbf{B}_b^T \mathbf{B}_b \end{bmatrix} dx \right\} \mathbf{d} \\
&\quad + \frac{1}{2} \int_0^l \mathbf{d}^T \{ (A_c - A_{sc}) \mathbf{B}_o \quad (G_c - G_{sc}) \mathbf{B}_b \} dx
\end{aligned} \tag{13}$$

여기서 A_g, G_g, I_g 는 콘크리트 단면의 총 단면적과 기준축에 대한 총 콘크리트 단면적의 단면 1차 및 2차 모멘트를 정의하고 z_{si} 는 기준축으로부터 i 번째 철근까지의 거리이며, A_{si} 는 i 번째 철근의 단면적을 의미한다. 식 (13)에서 변수 A_c 와 G_c 및 A_{sc} 와 G_{sc} 는 각각 다음과 같다.

$$A_c = \dot{E}_c (\epsilon_{om} - \epsilon_{ns}^n) A_g + \dot{E}_c \phi_n G_g - 2E_c \dot{\epsilon}_{ns} A_g, \quad G_c = \dot{E}_c (\epsilon_{om} - \epsilon_{ns}^n) G_g + \dot{E}_c \phi_n I_g - 2E_c \dot{\epsilon}_{ns} G_g \tag{14}$$

$$A_{sc} = \sum_i \dot{E}_c A_{si} (\epsilon_{om} - \epsilon_{ns}^n + \phi_n z_{si}) - 2E_c \dot{\epsilon}_{ns} A_{si}, \quad G_{sc} = \sum_i \dot{E}_c A_{si} z_{si} (\epsilon_{om} - \epsilon_{ns}^n + \phi_n z_{si}) - 2E_c \dot{\epsilon}_{ns} z_{si} A_{si} \tag{15}$$

여기서 $\epsilon_{om}, \phi_n, \epsilon_{ns}^n$ 및 E_c 는 각각 시간 $t=t_n$ 에서 평가된 $\epsilon_{om}, \phi, \epsilon_{ns}$ 및 E_c 를 각각 의미한다. 식 (14)와 (15)에서 크리프 변형률과 건조수축 변형률을 각각 초기상태 변형률과 최종상태 변형률에 시간 종속적 계수를 곱한 형태의 일반적인 시방서 규정함수를 사용하면 크리프 변형률 $\epsilon_{cr}(t) = C(t)(\epsilon_{ok} + \phi_k z)$, 건조수축 변형률 $\epsilon_{sh}(t) = S(t)\epsilon_{shu}$ 로 표시되며 이 경우에 각각의 증분률 관계는 $\dot{\epsilon}_{cr}(t) = \dot{C}_t(t)(\epsilon_{ok} + \phi_k z)$ 과 $\dot{\epsilon}_{sh}(t) = \dot{S}_t(t)\epsilon_{shu}$ 로 표시된다. 이 관계를 식 (14)와 (15)에 대입하면 식 (13)의 변수 A_c 와 G_c 및 A_{sc} 와 G_{sc} 는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$A_c = \dot{E}_c \{ (\epsilon_{om} - C_t^n \epsilon_{ok} - \epsilon_{sh}^n) A_g - (C_t^n \phi_k - \phi_n) G_g \} - 2E_c \{ (\dot{C}_t \epsilon_{ok} + \dot{\epsilon}_{sh}) A_g + \phi_k G_g \} \tag{16}$$

$$G_c = \dot{E}_c \{ (\epsilon_{om} - C_t^n \epsilon_{ok} - \epsilon_{sh}^n) G_g - (C_t^n \phi_k - \phi_n) I_g \} - 2E_c \{ (\dot{C}_t \epsilon_{ok} + \dot{\epsilon}_{sh}) G_g + \phi_k I_g \}$$

$$A_{sc} = \sum_i [E_c A_{si} \{ (\epsilon_{om} - C_t^n \epsilon_{ok} - \epsilon_{sh}^n) - (C_t^n \phi_k - \phi_n) z_{si} \} - 2E_c A_{si} \{ (\dot{C}_t \epsilon_{ok} + \dot{\epsilon}_{sh}) + \phi_k z_{si} \}] \tag{17}$$

$$G_{sc} = \sum_i [E_c A_{si} z_{si} \{ (\epsilon_{om} - C_t^n \epsilon_{ok} - \epsilon_{sh}^n) - (C_t^n \phi_k - \phi_n) z_{si} \} - 2E_c A_{si} z_{si} \{ (\dot{C}_t \epsilon_{ok} + \dot{\epsilon}_{sh}) + \phi_k z_{si} \}]$$

철근에 저장된 에너지 : U_s

$$U_s = \frac{1}{2} \int_{V_s} \dot{\sigma}_s \dot{\epsilon}_s dV_s = \mathbf{d}^T \left\{ \int_0^l E_s \begin{bmatrix} \sum_i A_{si} \mathbf{B}_o^T \mathbf{B}_o & \sum_i z_{si} A_{si} \mathbf{B}_o^T \mathbf{B}_b \\ \sum_i z_{si} A_{si} \mathbf{B}_b^T \mathbf{B}_o & \sum_i z_{si}^2 A_{si} \mathbf{B}_b^T \mathbf{B}_b \end{bmatrix} dx \right\} \mathbf{d} \tag{18}$$

식 (12), (13), (18)를 합하여 내적 증분 에너지를 계산하고 총 포텐셜 에너지 V 의 절점변위에 관한 극소화 조건인 $\partial V / \partial \mathbf{d} = 0$ 을 적용하면 요소 평형 방정식은 다음과 같이 구하여진다.

$$\mathbf{K} \mathbf{d} = \mathbf{F}_{ns} + \mathbf{F}_{ms} \tag{19}$$

여기서 구조물 강성행렬 $\mathbf{K} = \int_0^l \begin{bmatrix} A_r \mathbf{B}_o^T \mathbf{B}_o & G_r \mathbf{B}_o^T \mathbf{B}_b \\ G_r \mathbf{B}_b^T \mathbf{B}_o & I_r \mathbf{B}_b^T \mathbf{B}_b \end{bmatrix} dx$ 이고 $A_r = E_b A_b + E_c (A_g - \sum_i A_{si}) + E_s \sum_i A_{si}$,

$G_r = E_b G_b + E_c (G_g - \sum_i z_{si} A_{si}) + E_s \sum_i z_{si} A_{si}$, $I_r = E_b I_b + E_c (I_g - \sum_i z_{si}^2 A_{si}) + E_s \sum_i z_{si}^2 A_{si}$ 이다.

비역학적 하중에 의한 절점하중 $\mathbf{F}_{ns} = -\frac{1}{2} \int_0^l \{ (A_c - A_{sc}) \mathbf{B}_o \quad (G_c - G_{sc}) \mathbf{B}_b \} dx$ 이며 \mathbf{F}_{ms} 은 역학적 하중에 의한 절점하중을 각각 의미한다.

4. 이중합성 강박스 거더의 초기재령 거동해석

초기재령 합성형 강 박스 거더에서 콘크리트의 건조수축과 크리프 및 탄성계수의 발현의 비역학적 변형성질로 인한 거동해석을 위해 제안된 유한요소해석 관계식을 이중합성 강 박스 거더에 적용하였다. 이중합성 강 박스 거더는 박스의 부모멘트 구간인 내측지점 하단부 전·후 각 15m 구간에 콘크리트를 타설함으로써 중립축 하단 강재에 발생하는 큰 압축응력을 콘크리트가 분담하게 하는 구조형식이며, 3

경간 연속 이중합성 강 박스 거더의 교축 및 교축직각 방향 단면 형상이 그림 3와 같다.

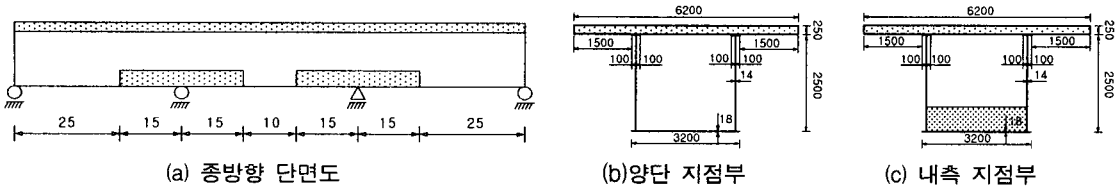


그림 3 이중합성 강 박스 거더 단면도 (단위 : mm)

4.1 건조수축에 의한 초기재령 거동

해석에 사용된 재령 28일 콘크리트 탄성계수 $E_{28}=2.5 \times 10^4 \text{MPa}$ 이고 강재의 탄성계수는 $E_s=2.1 \times 10^5 \text{MPa}$ 이며, 최종 건조수축 변형률은 8×10^{-4} 이며, 크리프 계수 $C_c(t) = t^{0.6} / (10 + t^{0.6}) C_u$ 이고 건조수축 계수 $S(t) = t / (t + 35)$, 콘크리트 탄성계수 $E_c(t) = \sqrt{t / (4 + 0.85t)} E_{28}$ 을 사용하였다. 하루 콘크리트의 타설두께 변화에 따른 거동변화를 분석하기 위해 타설 두께는 0, 200, 400, 600mm의 네 경우로 나누어 해석을 수행하였다.

그림 4(a)는 시간 $t=28$ 일에 강 박스의 상부슬라브와 부모멘트 구간 하단부 콘크리트의 건조수축 작용에 의해 발생하는 처짐해석결과를 보여준다. 부모멘트 구간 콘크리트 타설두께가 증가함에 따라 중앙지간 처짐량은 감소하는 반면에 외측 경간에서의 처짐량은 증가하는 결과를 보여준다. 부모멘트 구간 하단에 콘크리트가 타설되지 않은 경우에는 외측 경간 상부슬라브 콘크리트의 수축작용으로 인해 외측 경간에서는 하향의 처짐이 발생하나 중앙경간에서는 양 외측 경간 콘크리트의 하향처짐이 중앙경간에 대해 작용하는 부정정 효과로 인해 상향 처짐이 발생한다. 부모멘트 구간 하단부에 콘크리트가 타설된 경우에는 이 콘크리트의 건조수축으로 인해 중앙경간이 하향으로 처지게 되어 결과적으로 중앙지간 처짐이 감소하게 되며, 부모멘트 구간의 콘크리트 타설두께가 증가함에 따라 중앙경간 처짐이 점점 감소하게 된다. 콘크리트의 건조수축으로 인한 중앙경간 상향처짐은 상부슬라브 콘크리트에 인장응력을 초래하므로, 콘크리트 건조수축에 대한 보강을 필요로 하게 된다. 결과적으로 부모멘트 구간 하부에 타설된 콘크리트는 이러한 인장응력의 크기를 감소하게 하는 효과를 갖게 됨을 알 수 있다. 부모멘트 구간 콘크리트 타설두께가 증가함에 따라 처짐의 감소 및 증가량은 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있는 데 이는 근본적으로 콘크리트 타설두께가 중립축 높이로 접근하고 있음을 의미한다.

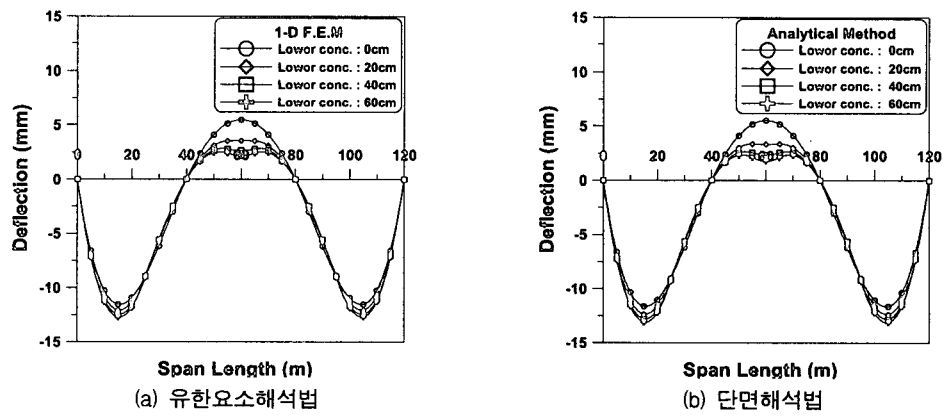


그림 4 부모멘트 구간의 콘크리트 타설두께 변화에 따른 건조수축 처짐곡선

그림 4(b)는 단면해석법에 근거로 계산된 모멘트 곡률관계를 이용하여 부정정 해석을 수행하고 처짐을 계산하는 일련의 해석적 방법을 통해 계산한 처짐곡선을 보여준다. 유한요소법에 의해 계산된 결과

와 해석적 방법에 의한 결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

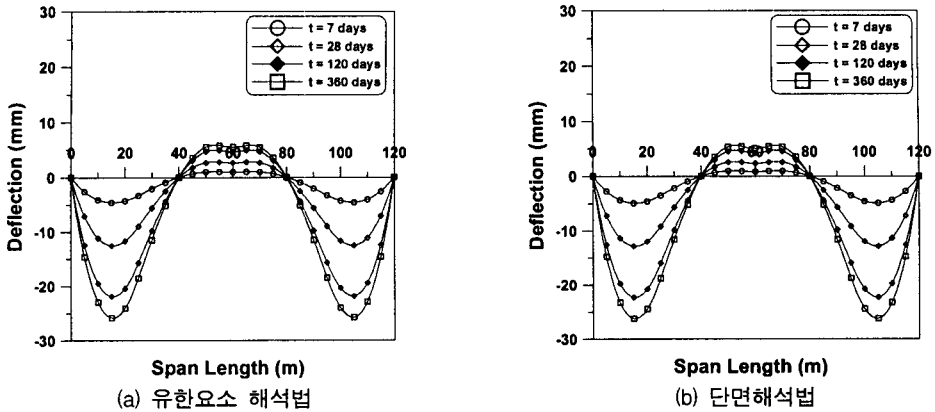


그림 5 시간의 경과에 따른 처짐곡선의 변화 (콘크리트 타설두께 400mm)

그림 5는 부모멘트 구간 콘크리트 타설두께가 400mm인 경우에 시간 $t=7, 28, 120, 360$ 일로 경과함에 따라 변화하는 처짐곡선을 보여준다. 시간이 경과함에 따라 처짐량은 증가하나 처짐의 증가율은 지속적으로 경과함으로써 최종적인 처짐은 일정한 값으로 수렴하고 있음을 보여준다.

5. 결론

초기재령 콘크리트의 탄성계수 변화와 크리프 및 건조수축 현상을 고려하는 강 합성 거더의 시간 종속적 유한요소해석 정식화를 수행하였다. 초기재령 콘크리트의 탄성계수 발현과정을 고려한 구성관계는 총 응력-변형을 관계를 Taylor의 선형급수 확장을 이용하여 기준시간에 관하여 확장함으로써 시간 종속적 증분형태로 유도하였다. 콘크리트, 강재 및 철근으로 구성되는 임의의 단면을 갖는 강합성 거더에 대하여 포텐셜 에너지를 구하고, 절점변위에 관하여 극소화함으로써 일반화된 시간 종속적 증분 유한요소 평형관계식을 유도하였다.

부모멘트 구간의 강박스 하단에 콘크리트를 타설한 이중합성 박스거더의 초기재령 거동해석을 수행하였으며, 초기재령 상태에서 콘크리트 탄성계수의 발현과정을 고려한 시간 종속적 유한요소해석법과 단면해석법의 결과를 비교함으로써 해석의 정확성을 검증하였다.

참고문헌

- Bradford, M. A., (1991), "Deflections of Composite Steel-Concrete Beams Subject to Creep and Shrinkage ", ACI Structural J., Vol.88, No.5, pp.610-614.
- Chiu, H. S., Chern, J. C. and Chang, K. C., (1996), "Long-Term Deflection Control in Cantilever Prestressed Concrete Bridges ", Journal of Engineering Mechanics, Vol.122, No.6, June, pp.495-501.
- Ghali, A., (1986), "A Unified Approach for Serviceability Design of Prestressed and Non-Prestressed Reinforced Concrete Structures ", PCI Journal, Vol.31, No.2, March-April, pp.118-137.
- Gilbert, R. I. and Bradford, M. A., (1995), "Time-Dependent behavior of continuous Beams at service loads ", J. of Structural Engineering, ASCE, Vol.121, No.2, pp.319-327.
- Jendele, L. and Phillips, D. V., (1992), "Finite Element Software for Creep and Shrinkage in Concrete ", Computers & Structures, Vol.45, Issue.1, pp.113-126.
- Kwak, H. G. and Seo, Y. J., (2000), "Long-Term Behavior of Composite Girder Bridges ", Computers & Structures, Vol.74, Issue.5, June, pp.583-599.