

프리스트레스가 도입된 프리캐스트 합성보 (EPC 합성보) Eco Prestressed PC Beam



1. 개요

현대사회는 급변하고 있는 시대적 상황에 따라 건축의 요구는 갈수록 초고층화/ 장스팬의 구현을 요구하고 있다. 장스팬의 구현을 위해서는 시공 시 CRANE 장비 운용에 대한 제약으로 기본의 장비운용에 대한 사양으로는 부재자체의 양중능력이 떨어질 수밖에 없다. 그러므로 재료 자체를 경량화해야 하는 재료를 사용할 수밖에 없다. 그러나 철골과 같은 경량의 재료는 추후 내화피복을 하여야하며 이는 현재 친환경을 요구하는 소비자의 입장에 반하는 것으로 반드시 개선되어야 할 점이다. 아울러 철골부재의 사용으로 장스팬을 구현함은 건물사용자에게 진동과 같은 심각한 불쾌감을 유발할 수 있다. 이와 같은 건설시장에 장스팬의 구현을 위하여 해결하여야할 과제들, 즉, 내화피복, 시공 시 양중 능력치 내에서 시공성 향상과 처짐/진동에 대한 사용성 향상을 위해 단부 고정을 기할 수 있는 EPC기둥, EPC합성보, 측면거푸집으로 구성된 골조시스템(이하 EPC시스템)을 개발하였다.

2. 국내, 외 합성보 기술 사례

국외 사례의 경우, Slim Floor를 사용한 사례가 있다. 데크플레이트와 콘크리트 슬래브로 이루어진 합성슬래브 구조와 비슷하지만 일반적인 합성슬래브와는 달리 H형강이나 각형강관의 하부 플랜지에 플레이트를 추가로 용접하여 데크플레이트를 보 부재의 플랜지에 용접된 플레이트 위에 오도록 하여 층고를 줄이도록 하는 방식이 있다.

국내에서는 단부접합개선형 프리스트레스 PC보, TSC보, TU보등이 있다. Fig. 1의 단부접합개선형 프리스트레스 PC보는 단부에 H형강을 조합한 합성보로 콘크리트와 철골의 재료적 장점을 활용하였고, 공장제작을 통



이 호 찬 Lee, Ho Chan
 (주)MCS-ST 구조기술사 사무소
 M.C.S Structural Engineering
 대표이사
 lhc@mcs-tech.co.kr



오 인 환 Oh, In Hwan
 (주)MCS-ST 구조기술사 사무소
 M.C.S Structural Engineering
 대리
 wowohdang@naver.com



최 영 후 Choi, Young Hoo
 (주)MCS-ST 구조기술사 사무소
 M.C.S Structural Engineering
 사원
 jabberwock7@naver.com

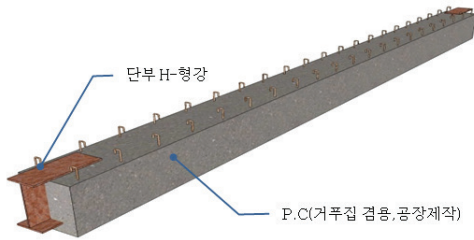


Fig. 1 EPC 합성보

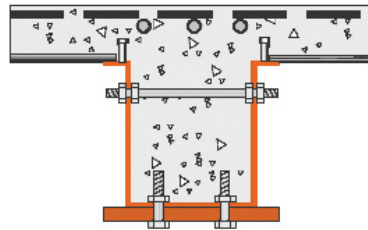


Fig. 2 OTSC보

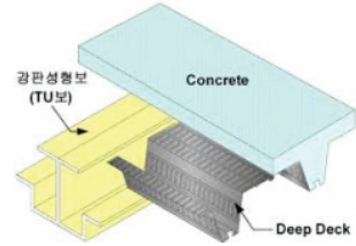


Fig. 3 TU보

해 현장에서의 현장작업을 최소화할 수 있다.

TSC보는 Fig.2와 같이 3면이 폐쇄된 강관에 콘크리트를 채워 넣어 철근 콘크리트와 철골구조의 장점을 추출하여 접목시킨 공법이다. 철근 역할을 겸하는 형 강관재 영구 거푸집 윗 날개에 데크를 얹어 콘크리트를 채운 합성보로서, 휨 강성 증가, 처짐 감소, 진동 특성 우수, 균열 중성화 방지, 내구성 연장, 층고 절감, 자재물량 등의 장점이 있다.

TU보는 Fig. 3과 같이 한쌍의롤(또는프레스)성형 절곡강관을 서로 맞대어 용접하여 제작하는 강관성형 보공법이다. 측면판의 높이조절이 자유롭기 때문에 기존의 층고절감 방식과는 달리 다양한 슬래브를 적용할 수 있는 신개념의 강관성형보공법이다. 거푸집이 필요 없고 공기가 단축되어 시공성, 생산성, 경제성 등이 우수하다는 장점이 있다.

한 합성보로 하부 공장제작용 프리캐스트 콘크리트에 프리스트레스를 도입하여, 측면 강재거푸집을 활용하여 철골과 하부공장제작용콘크리트와 측면거푸집으로 구성된 합성보로서 시공성 및 성능을 향상시킨 효율성이 뛰어난 복합보이다.

EPC시스템의 형상은 Fig.5와 같이 (a) 하부 프리캐스트 PC보에 현장타설콘크리트 거푸집 역할을 위하여 측면에 강관을 설치한 구형 EPC시스템 형태와 (b) 하부 프리캐스트 PC보에 현장타설콘크리트 거푸집 역할을

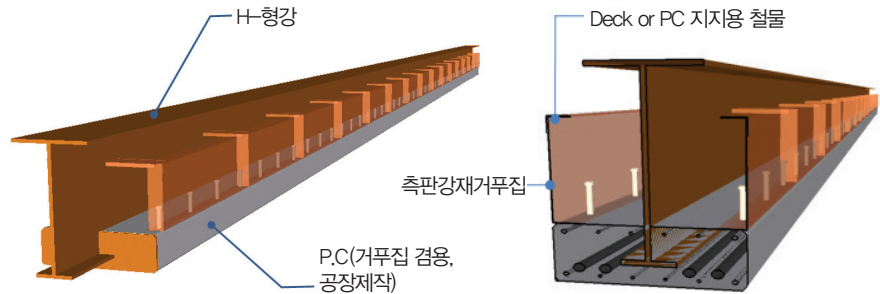


Fig. 4 EPC 합성보 형상

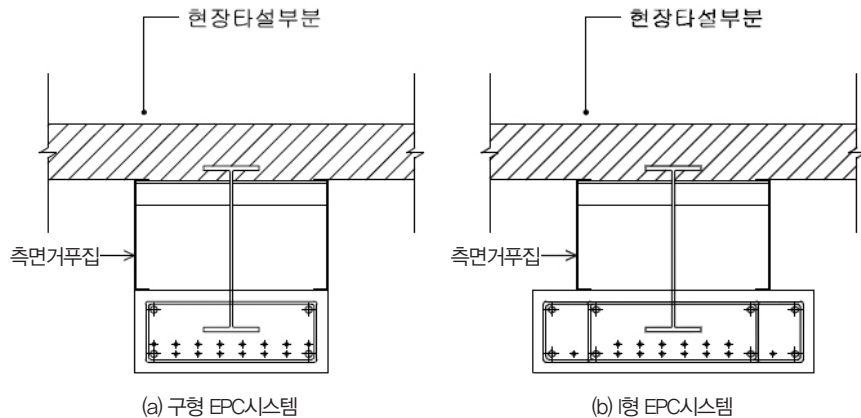


Fig. 5 EPC합성보 단면 형상

3. EPC 합성보 시스템

3.1 EPC 시스템 소개 및 형상

EPC시스템은 Fig. 4와 같이 SRC합성보의 경제성과 철골보의 단부 접합부 시공성을 활용

위하여 측면에 강판을 설치한 I형 EPC시스템 형태로 나뉜다.

3.2 EPC 시스템 특징

EPC시스템의 특·장점은 크게 다섯 가지로 볼 수 있다. (1) Deck 슬래브나 one-way PC 슬래브를 측판지지 거푸집에 지지하여 별도의 내화피복이 필요 없고, 내부에 SRC 구조물로 단부고정을 통하여 단면의 구조성능을 향상시킬 수 있다.

(2) Slimfloor System으로 PC 슬래브 활용 슬림플로어 설계가 가능하고, 보 춤을 감소, 층고절감효과를 극대화할 수 있다. (3) 철골 및 강재를 이용하여 구조체를 결합, 콘크리트와의 일체성을 확보하였으며, 전단철근이 필요 없고 물량이 감소하여 경제성을 극대화 할 수 있다. (4) 철골 보를 이용하여 단부 접합을 단순화하였으며, (5) 장스팬 계획 시 SRC 단면으로 처짐 및 진동에 유리하고, 시공 시 부재단면을 최적화하여 양중에 유리하도록 중량을 감소할 수 있다.

4 EPC 설계 절차

4.1 EPC 설계 일반사항

① EPC-II 합성보 단면의 산정은 탄성이론에 따르는 것을 원칙으로 하되, 강도설계법 또는 한계상태설계법에 의해 내하력을 검토한다.

② EPC-II 합성보의 설계는 구조물의 수명기간 동안 발생하는 모든 재하단계에 따라 작용하는 하중에 대한 구조부재의 강도와 구조거동을 기초로 이루어져야 한다.

③ 프리스트레싱에 의해 발생하는 응력집중은 설계 시 검토되어야 한다.

④ 프리스트레싱에 의해 발생하는 부재의 탄성변형, 소성변형, 처짐, 길이변화 및 비틀림 등에 의해 인접한 구조물에 미치는 영향을 고려한다. 이때 온도와 건조수

축의 영향도 고려한다.

4.2 EPC 설계 휨 강도 산정

4.2.1 휨 강도 일반사항

① EPC-II 합성보의 설계휨강도 계산은 강도설계법 또는 한계상태설계법에 따라야 한다. 이때 프리스트레싱 긴장재의 응력은 f_s 대신 f_{ps} 를 사용한다.

② f_{ps} 는 변형률 적합조건을 기초로 하여 계산한다. 다만 보다 정확하게 f_{ps} 를 계산하지 않는 경우에 f_{pe} 의 값이 $0.5f_{pu}$ 이상이면 다음의 근사식으로 f_{ps} 를 구할 수 있다.

③ 프리스트레싱 긴장재가 부착되는 부재에 대해서는 f_{ps} 를 다음 식(2-1)에 의하여 구할 수 있다.

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left\{ p_p \frac{f_{pu}}{f_{ck}} + \frac{d}{d_p} (w - w') \right\} \right] \quad (2-1)$$

식(2-1)의 f_{ps} 계산 시 압축철근을 고려한다면 다음 식(2-2) 및 식(2-3)을 충족시켜야 한다.

$$\left[p_p \frac{f_{pu}}{f_{ck}} + \frac{d}{d_p} (w - w') \right] \geq 0.17 \quad (2-2)$$

$$d \leq 0.15d_p \quad (2-3)$$

④ 프리스트레싱 긴장재가 부착되지 않은 부재에 있어서 f_{ps} 는 다음 식(2-4)와 식(2-5)에 따라 구할 수 있다.

i) 높이에 대한 경간의 비가 35이하인 경우

$$f_{ps} = f_{se} + 70 + \frac{f_{ck}}{100p_p} \quad (2-4)$$

여기서, f_{ps} 는 f_{py} , 또는 $(f_{se} + 400)$ 이하로 하여야 한다.

ii) 높이에 대한 경간의 비가 35보다 큰 경우

$$f_{ps} = f_{se} + 70 + \frac{f_{ck}}{300p_p} \quad (2-5)$$

여기서, f_{ps} 는 f_{py} , 또는 $(f_{se} + 210)$ 이하로 한다.

⑤ 프리스트레싱 긴장재와 함께 사용되는 철근도 휨 강도 계산 시 인장력을 발휘하는 것으로 볼 수 있다. 이 때 인장력은 변형률 적합조건을 적용한 해석에 의해 구한 철근의 응력에 근거한다.

⑥ 합성단면의 공칭강도를 결정하는 데에는 소성응력 분포법과 변형률적합법의 2방법이 사용될 수 있다. 합성 단면의 공칭강도를 결정하는데 있어 콘크리트의 인장강도는 무시한다.

i) 소성응력분포법

소성응력분포법에서는 강재가 인장 또는 압축으로 항복응력에 도달할 때 콘크리트는 압축으로 $0.85f_{ck}$ 의 응력에 도달한 것으로 가정하여 공칭강도를 계산한다.

ii) 변형률적합법

변형률적합법에서는 단면에 걸쳐 변형률이 선형적으로 분포한다고 가정하며 콘크리트의 최대압축변형률을 0.003mm/mm 로 가정한다. 강재 및 콘크리트의 응력-변형률관계는 실험을 통해 구하거나 유사한 재료에 대한 공인된 결과를 사용한다.

4.2.2 시어커넥터를 갖는 합성보의 강도

① 정모멘트에 대한 휨강도

정모멘트에 대한 설계휨강도 $\Phi_b M_n$ 은 항복한계상태로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\Phi_b = 0.90$$

i) $h / t_w \leq 3.76\sqrt{k_v E / F_y}$ 인 경우

M_n 은 합성단면의 항복한계상태에 대해 소성응력분포로부터 산정한다(소성모멘트).

ii) $h / t_w \leq 3.76\sqrt{k_v E / F_y}$ 인 경우

M_n 은 등바리의 영향을 고려하여 항복한계상태에 대해 탄성응력을 중첩하여 구한다(항복모멘트).

② 부모멘트에 대한 휨강도

부모멘트에 대한 설계휨강도 $\Phi_b M_n$ 은 [KBC2009] 0706에 따라 강재단면만을 사용하여 구해야 한다. 또는 부모멘트에 대한 설계휨강도는 아래와 같은 계수를 사용하여 항복한계상태(소성모멘트)에 대해 합성단면의 소성응력분포로부터 구할 수 있다.

$$\Phi_b = 0.90$$

다만, 이 때에는 다음과 같은 조건들을 만족해야 한다.

i) 강재보는 콤팩트단면이며 [KBC2009] 0706에 따라 적절히 횡지지되어야 한다.

ii) 부모멘트 구간에서 콘크리트슬래브와 강재보 사이에 시어커넥터가 설치되어야 한다.

iii) 유효폭 내의 강재보에 평행한 슬래브철근은 적절히 정착되어야 한다.

4.2.3 시어커넥터

① 정모멘트 구간에서의 하중의 전달

[KBC 2009] 0709.3.3의 매입형 합성단면을 제외하고는, 강재보와 슬래브면사이의 전체 수평전단력은 시어커넥터에 의해서만 전달된다고 가정한다. 휨모멘트를 받는 강재보와 콘크리트가 합성작용을 하기 위해서는, 정모멘트가 최대가 되는 위치와 모멘트가 0이 되는 위치 사이의 총수평전단력 V 는 콘크리트의 압괴, 강재단면의 인장항복, 그리고 시어커넥터의 강도 등의 3가지 한계상태로부터 구한 값 중에서 가장 작은 값으로 한다.

i) 콘크리트 압괴

$$V' = 0.85f_{ck}A_c \tag{2-6}$$

ii) 강재단면의 인장항복

$$V' = F_y A_s \tag{2-7}$$

iii) 시어커넥터의 강도

$$V' = \Sigma Q_n \quad (2-8)$$

여기서, A_c : 유효폭 내의 콘크리트 단면적, mm^2

A_s : 강재단면적, mm^2

ΣQ_n : 정모멘트가 최대가 되는 위치와 모멘트가 0이 되는 위치 사이의 시어커넥터 공칭강도의 합, N

② 부모멘트 구간에서의 하중전달

연속합성보에서 부모멘트구간의 슬래브 내에 있는 길이방향철근이 강재보와 합성으로 작용하는 경우, 부모멘트가 최대가 되는 위치와 모멘트가 0이 되는 위치 사이의 총수평전단력 V' 는 슬래브 철근의 항복과 시어커넥터의 강도 등의 2가지 한계상태로부터 구한 값 중에서 작은 값으로 한다.

i) 슬래브 철근의 인장강도

$$V' = F_{yr} A_r \quad (2-9)$$

여기서, A_r : 콘크리트 슬래브의 유효폭 내에 있는 적절하게 정착된 길이방향철근의 단면적, mm^2

F_{yr} : 철근의 설계기준 항복강도, MPa

ii) 시어커넥터의 강도

$$V' = \Sigma Q_n \quad (2-10)$$

③ 스티드 시어커넥터의 강도

콘크리트슬래브 또는 합성슬래브에 매입된 스티드시어커넥터 1개의 공칭강도 Q_n 은 다음과 같이 산정한다.

$$Q_n = 0.5A_{sc}\sqrt{f_{ck}E_c} \leq R_g R_p A_{sc} F_u \quad (2-11)$$

여기서, A_{sc} : 스티드시어커넥터의 단면적, mm^2

E_c : 콘크리트 탄성계수, MPa

F_u : 스티드시어커넥터의 설계기준 인장강도, MPa

f_{ck} : 콘크리트 설계기준 압축강도, MPa

$R_g=1.0$: (a) 데크플레이트의 골방향이 강재보에 직각이며 골내에 용접되는 스티드의 개수가 1개인 경우

(b) 스티드가 일렬로 강재에 직접 용접된 경우

(c) 데크플레이트의 골방향이 강재보와 평행하며 스티드가 데크를 통해 일렬로 용접되며 골의 평균폭과 골의 높이의 비가 1.5이상인 경우

$R_g=0.85$: (a) 데크플레이트의 골방향이 강재보에 직각이며 골내에 용접되는 스티드의 개수가 2개인 경우

(b) 데크플레이트의 골방향이 강재보와 평행하며 스티드가 데크를 통해 일렬로 용접되며 골의 평균폭과 골의 높이의 비가 1.5보다 작으며 스티드의 개수가 1개인 경우

$R_g=0.75$: (a) 데크플레이트의 골방향이 강재보에 직각이며 골내에 용접되는 스티드의 개수가 3개인 경우

$R_p=1.0$: 스티드가 강재에 직접 용접되며 데크플레이트에 의해 덮이는 강재상부플랜지의 부분이 전체 50%를 초과하지 않도록 현치를 갖는 경우

$R_p=0.75$: (a) 데크플레이트의 골방향이 강재보에 직각이며 $e_{mid-ht} \geq 50\text{mm}$: 인 합성슬래브에 용접되는 스티드의 경우

(b) 데크플레이트의 골방향이 강재보와 평행하며 합성슬래브에 매입되는 스티드가 데크플레이트를 통해 용접되는 경우

$R_p=0.6$: (a) 데크플레이트의 골방향이 강재보에 직각이며 $e_{mid-ht} < 50\text{mm}$: 인 합성슬래브에 용접되는 스티드의 경우

(b) 스티드 몸체의 바깥면으로부터 데크플레이트 웨브(데크골의 중간높이)까지의 거리이며 스티드의 하중저항방향, 즉 단순보에서 최대모멘트의 방향으로의 거리

W_c : 콘크리트의 단위체적당 무게

$(1,500 \leq W_c \leq 2500\text{kg/m}^3)$

단, 데크플레이트가없는 경우 R_g 와 R_p 의 값은 1.0을 적용한다.

4.2.4 휨부재의 보강에 대한 제한사항

① 다음 ②항에 해당하는 경우를 제외하고 부재의 휨 강도를 계산하는데 사용된 강재지수 $[w_{pw} + (d_s / d_p)(w_w - w'_w)]$ 는 $0.36\beta_1$ 이하로 한다. 여기서, w_{pw} , w_w , w'_w 는 압축플랜지가 있는 단면의 강재지수로서 를 북부쪽으로 하는 것 외에는 w_p , w , w' 를 계산하는 식과 같다.

② 강재지수가 위 ①항의 조건을 만족하지 않는 경우 설계휨강도는 압축축 내력으로 구한 휨모멘트를 기초로 계산된 휨강도를 초과하지 않도록 한다.

③ 철근과 프리스트레스트 보강재의 전체량은 식(2-12)의 콘크리트 파괴계수 f_r 을 기초로 하여 계산된 균열하중의 1.2배 이상의 계수하중을 받는 데 충분하여야 한다. 이때 전단강도와 휨강도가 [KBC2009 0503.3.2 소요강도]에 요구되는 계수하중으로 계산된 값의 2배 이상이 되는 휨부재는 이 조건을 따르지 않을 수 있다.

$$f_r = 0.63\sqrt{f_{ck}} \quad (2-12)$$

4.3 EPC 설계 전단강도 산정

4.3.1 전단강도 일반사항

전단강도는 다음 2가지 방법으로 산정한다.

① 2.3.3은 부재의 좌굴 이후 강도(인장역작용)를 이용하지 않고 산정한다.

② 2.3.3의 (2)①의 $h / t_w \leq 2.24\sqrt{E/F_y}$ 인 압연 H형강의 웨브를 제외하고 이절의 설계전단강도 $\Phi_v V_n$ 은 다음과 같이 산정한다.

$$\Phi_v = 0.90$$

4.3.2 비구속 또는 구속웨브를 갖는 부재

이 조항은 웨브면 내에 전단력을 받는 1축 또는 2축대칭단면과 C형강의 웨브에 적용한다.

비구속 또는 구속판요소웨브의 공칭전단강도 V_n 은 전단항복과 전단좌굴의 한계상태에 따라 다음과 같이 산정한다.

$$V_n = 0.6F_y A_w C_v \quad (2-13)$$

① $h / t_w \leq 2.24\sqrt{E/F_y}$ 인 압연 H형강의 웨브

여기서, $\Phi_v = 1.0$

$$C_v = 1.0$$

② 원형강관을 제외한 모든 2축 대칭단면, 1축대칭단면 및 C형강의 전단상수는 다음과 같이 산정한다.

i) $h / t_w \leq 1.10\sqrt{k_v E/F_y}$ 일 때

$$C_v = 1.0 \quad (2-14)$$

ii) $h / t_w \leq 1.10\sqrt{k_v E/F_y} < h / t_w \leq 1.37\sqrt{k_v E/F_y}$ 일 때

$$C_v = \frac{1.10\sqrt{k_v E/F_y}}{h / t_w} \quad (2-15)$$

iii) $h / t_w \leq 1.37\sqrt{k_v E/F_y}$ 일 때

$$C_v = \frac{1.51Ek_w}{(h/t_w)F_y} \quad (2-16)$$

여기서, A_w : 부재 전체춤 d 와 웨브의 두께 t_w 의 곱, mm^2

③ 웨브판좌굴계수 k_v 는 다음과 같이 산정한다.

i) T형강의 스템을 제외한 $h / t_w < 260$ 인 비구속지지된 판요소웨브

$$k_v = 5.0 \quad (2-17)$$

ii) $h / t_w < 260$ 인 T형강의 스템

$$k_v = 1.2 \quad (2-18)$$

iii) 구속판요소웨브

$$k_v = 5 + \frac{5}{(a/h)^2} \quad (2-19)$$

여기서, a : 수직스티프너의 순간격, mm

h : 압연강재에서 모살 또는 코너반경을 제외한 플랜지간 순거리, mm

용접한 경우에는 플랜지간 순거리, mm

볼트조립단면에서는 파스너 열간거리, mm

4.3.3 프리스트레스 콘크리트 부재에서 콘크리트에 의한 전단강도

힘철근 인장강도의 40% 이상의 유효 프리스트레스 힘이 작용하는 부재의 경우 ②항에 의하여 계산하지 않는 한 다음 식(2-20)에 따라 V_c 를 계산한다.

$$V_c = \left(0.05\sqrt{f_{ck}} + 4.9\frac{V_{ud}}{M_u}\right)b_wd \quad (2-20)$$

그러나 V_c 는 $(\sqrt{f_{ck}}/6)b_wd$ 이상, $0.42\sqrt{f_{ck}}b_wd$ 이하이며, 또한 ③항 및 ④항에서 주어진 값 이하로 취한다. 이 식에서 V_{ud}/M_u 는 1.0 이하이고, M_u 는 고려하는 단면에서 V_u 와 동시에 발생하는 계수휨모멘트이다. 또 이 식을 적용할 경우 V_{ud}/M_u 항의 d 는 압축축 연단에서 긴장재 중심까지의 거리이다.

전단강도 V_c 는 다음 식(2-21)과 식(2-22)에 따라 계산할 수도 있다.

여기서 V_c 는 V_{ci} 와 V_{cw} 중에서 작은 값으로 한다.

전단강도 V_{ci} 는 다음 식으로 계산한다.

$$V_{ci} = 0.05\sqrt{f_{ck}}b_wd + V_d + \frac{V_iM_{cr}}{M_{max}} \quad (2-21)$$

그러나 V_{ci} 는 $0.14\sqrt{f_{ck}}b_wd$ 이상이어야 하며, M_{cr} 은 다음 식(2-22)로 계산한다.

$$M_{cr} = \frac{I_r}{y_i}(0.05\sqrt{f_{ck}} + f_{se} - f_d) \quad (2-22)$$

위의 식에서 M_{max} 과 V_i 의 값은 해당 단면에 최대 휨모멘트가 일어나는 하중조합으로부터 계산한다.

전단강도 V_{cw} 는 다음 식(2-23)로 계산할 수 있다.

$$V_{cw} = (0.29\sqrt{f_{ck}} + 0.3f_{pc})b_wd + V_p \quad (2-23)$$

이 식을 대신하여 V_{cw} 는 부재의 중심축에서 또는 중심축이 플랜지 내에 있을 때는 플랜지와 복부의 교차선에서 $\sqrt{f_{ck}}/3$ 의 주인장응력이 일어나는 고정하중과 활하중에 해당되는 전단력으로 구할 수 있다. 합성부재에서 주인장응력은 활하중을 저항하는 단면을 사용하여 구한다.

5. 결론

EPC시스템은 기존 합성보SRC와 철골보의 단부 접합부 시공성을 활용한 것으로 프리스트레스를 도입한 프리캐스트 콘크리트와 보 측면에 거푸집이 형성되어 공기 단축과 시공성을 향상시킨 합성보이다.

본 기고에서 소개한 EPC 시스템은 공기 단축과 물량 감소로 경제적 효과가 상당할 것으로 판단된다. 또한, 일반 합성슬래브를 적용한 사례와 비교했을 경우, 약 10~15%이상의 공사비 절감을 통해 경제성을 확보할 수 있는 것으로 보인다. 나아가, 물류창고 등 장스팬이 요구되는 건축물에 적합한 공법으로서, 장스팬의 구현을 위하여 해결하여야 할 내화피복, 시공성 향상과 처짐, 진동에 대한 사용성 향상을 기대할 수 있다. ■