

# 고속 철도 PSC 분기침목의 자동화설계

## Automated Design of PSC Sleepers in High Speed Railway Turnouts

오병환\*, 임시내\*\*, 최영철\*\*\*

Oh, Byung Hwan, Lim, Si Nae, Choi, Young Cherl

---

### Abstract

The design of sleeper in high-speed railway turnouts is complicated and time-consuming because the length and loading position of sleepers change continuously along the turnout line. It is, therefore, necessary to develop an automated design program which can design automatically the PSC sleepers in turnout region. In this study, a computer program for automatic design of turnout sleepers was developed based on graphic user-interface(GUI) environment. The structural analysis is performed considering the varying loading position of vehicular wheels. The sleepers are treated as located on elastic supports. The user can choose the desirable shape of sleepers before starting the detail design. The present study allows more realistic and automatic design of PSC sleepers in high-speed railway turnouts.

---

### 1. 서론

고속분기기에서는 분기기의 형상에 따라 분기기 시점부터 종점까지 레일의 분기에 의해 분기침목의 길이가 변한다. 이러한 이유로 설계자가 각각 다른 형상과 하중의 재하위치에 대한 분기침목을 개별적으로 기존의 설계방식으로 수동 설계하는 데에는 많은 복잡함과 어려움이 따른다.

따라서 본 연구에서는 분기기상에 열차가 통과할 때 열차하중에 의한 분기침목을 구조해석을 통해 설계 모멘트를 구하고 분기침목의 설계를 신속하고 간편하게 할 수 있는 고속분기기 PC분기침목 설계 자동화 프로그램을 개발하였다.

### 2. 침목 해석

분기침목은 길이가 각각 다르며 열차하중에 의한 하중과 작용하는 위치가 다르다. 본 연구에서는 다음 그림 1과 같이 지반반력을 스프링으로 치환하여 각 하중과 작용위치를 고려하여 자동화된 해석프로그램을 개발하였으며 이를 이용하여 분기침목에 작용하는 최대 하중효과를 산정하였다.

---

\* 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수, 02-880-7350, civilcon@gong.snu.ac.kr

\*\* 서울대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, 02-880-8308, stream78@korea.com

\*\*\* 서울대학교 공과대학 토목공학과 박사과정, 02-880-8308, zero@conlab.snu.ac.kr

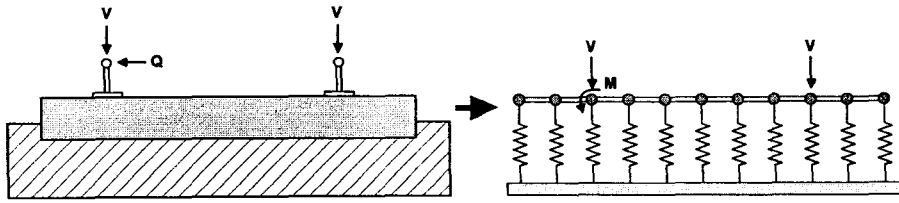


그림 1. 분기침목 해석 모델

### 3. 침목 단면 설계

열차하중에 의해 분기침목에 작용하는 최대하중 효과를 기본으로 하여 고속분기기 침목 단면설계의 방법은 그림 2와 같다.

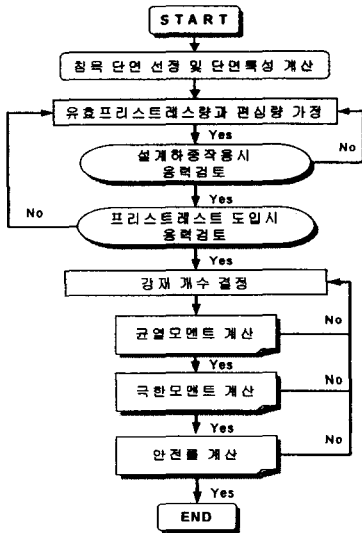


그림 2. 단면설계 흐름도

표 1. 각 하중단계에 대한 허용응력

□ 사용하중 작용시의 허용응력	
허용 휨 압축응력*	$f_{cs}=0.4f_{ck}$
허용 휨 인장응력*	$f_{ts}=0$
□ 프리스트레스 도입 직후의 허용응력	
프리스트레스 도입 직후	
콘크리트의 압축강도*	$f_{ci}'=0.8f_{ck}$
허용 휨 압축응력*	$f_{ci}=0.6f_{ci}'$
허용 휨 인장응력*	$f_{ti}=0.75\sqrt{f_{ci}'}$

$f_{ck}$  : 콘크리트의 설계기준 압축강도

\*PC 휨부재의 각 하중단계에 대한 응력들의 허용응력은 고속철도 PC침목 설계표준시방서에 따른다

#### 3.1 단면 특성 계산

프로그램 User에게 입력받은 자료로부터 그림 3과 같은 침목 단면의 단면적 및 도심, 단면 2차 모멘트 등을 다음과 같이 각각 계산한다.

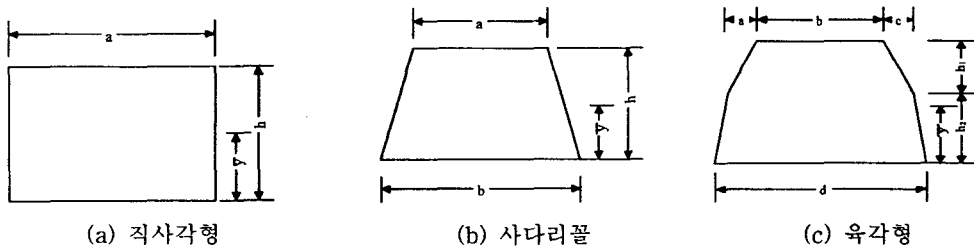


그림 3. 사용자로부터 입력받는 단면의 종류

표 2. 침목의 단면특성

구분	직사각형	사다리꼴	육각형
단면 2차 모멘트	$I = \frac{ah^3}{12}$	$I = \frac{(a^2 + 4ab + b^2)h^3}{36(a+b)}$	$I_1 = \frac{\{(a+b+c)^2 + 4(a+b+c)b + b^2\}h_1^3}{36\{(a+b+c)+b\}}$ $I_2 = \frac{\{(a+b+c)^2 + 4(a+b+c)d + d^2\}h_2^3}{36\{(a+b+c)+d\}}$ $I = \{I_1 + A_1(\bar{y} - \bar{y}_1)^2\} + \{I_2 + A_2(\bar{y} - \bar{y}_2)^2\}$
중립축	$\bar{y} = \frac{h}{2}$	$\bar{y} = \frac{h(2a+b)}{3(a+b)}$	$\bar{y}_1 = \frac{h_1\{2b+(a+b+c)\}}{3\{(a+b+c)+b\}} + h_2$ $\bar{y}_2 = \frac{h_2\{2(a+b+c)+d\}}{3\{(a+b+c)+d\}}$ $\bar{y} = \frac{A_1\bar{y}_1 + A_2\bar{y}_2}{A_c}$

### 3.2 유효프리스트레스량과 편심량 결정

유효프리스트레스량과 편심량은 최대 정모멘트가 작용하는 레일직하부와 최대 부모멘트가 작용하는 침목 중앙부의 상하 연단에서의 응력이 허용응력 이하라는 조건으로부터 결정되며, 각각에 대한 조건은 다음 표 3과 같다.

표 3. 유효프리스트레스량과 편심량 결정을 위한 조건

구분	레일직하부(설계 정모멘트)	침목중앙부(설계 부모멘트)
침목 상부	$f_{up} = -\frac{P_e}{A_c} - \frac{M_P}{Z_1} + \frac{P_e \cdot e}{Z_1} \geq f_{\alpha}^*$	$f_{up} = -\frac{P_e}{A_c} - \frac{M_N}{Z_1} + \frac{P_e \cdot e}{Z_1} \leq f_{\beta}^*$
침목 하부	$f_{down} = -\frac{P_e}{A_c} + \frac{M_P}{Z_2} - \frac{P_e \cdot e}{Z_2} \leq f_{\alpha}^*$	$f_{down} = -\frac{P_e}{A_c} + \frac{M_N}{Z_2} - \frac{P_e \cdot e}{Z_2} \geq f_{\beta}^*$

\*  $f_{up}$  : 침목의 상단응력 ( $kgf/cm^2$ ),  $f_{down}$  : 침목의 하단응력 ( $kgf/cm^2$ ),  $P_e$  : 유효프리스트레스량 ( $kgf$ )  
 $e$  : 편심 ( $cm$ ),  $A_c$  : 콘크리트 단면적 ( $cm^2$ ),  $Z_1$  : 상단 단면계수 ( $cm^3$ ),  $Z_2$  : 하단 단면계수 ( $cm^3$ )  
 $M_P$  : 설계 정모멘트 ( $kgf \cdot cm$ ),  $M_N$  : 설계 부모멘트 ( $kgf \cdot cm$ )  
 $f_{\alpha}^*$  : 사용하중 작용시의 허용 휨 압축응력 ( $kgf/cm^2$ )  
 $f_{\beta}^*$  : 사용하중 작용시의 허용 휨 인장응력 ( $kgf/cm^2$ )

### 3.3 프리스트레스 도입 직후의 응력 검토

초기 프리스트레스 도입시에는 프리스트레스힘만이 작용하므로 부재의 각 상하 연단에 발생하는 응력은 시방서에 규정된 허용응력 범위내에 존재하여야 하며 표 4와 같다.

표 4. 프리스트레스 도입 직후의 응력 검토를 위한 조건

구분	침목 상부	침목 하부
	$f_{up} = -\frac{P_i}{A_c} + \frac{P_i \cdot e}{Z_1} \leq f_{\beta}^*$	$f_{down} = -\frac{P_i}{A_c} - \frac{P_i \cdot e}{Z_2} \geq f_{\alpha}^*$

\*  $P_i$  : 초기프리스트레스량 ( $kgf$ ),  $f_{\alpha}^*$  : 프리스트레스 도입 직후 콘크리트의 압축강도 ( $kgf/cm^2$ )  
 $f_{\beta}^*$  : 프리스트레스 도입 직후의 허용 휨 인장응력 ( $kgf/cm^2$ )  
 $f_{\alpha}$  : 프리스트레스 도입 직후의 허용 휨 압축응력 ( $kgf/cm^2$ )

### 3.4 전달길이 계산

프리텐션 부재에서는 PS강재와 콘크리트 사이의 부착에 의하여 프리스트레스가 도입된다. 그러나 프리스트레스 도입 직후 콘크리트와 강재사이의 부착에 의해 부재단부에서 일정거리 이후에 강재의 응력은 유효프리스트레스에 도달하게 된다. 이러한 거리를 전달길이(Transfer length)라고 하며 식 (1)과 같다. 레일에 의한 하중의 위치가 전달길이 내에 들어오면 취성파괴를 일으킬 수 있기 때문에 이에 대한 검토를 하여야 한다.

$$l_t = 0.015 \left( \frac{f_{pe}}{3} \right) d_b \quad (1)$$

여기서,  $l_t$  : 전달길이 (cm),  $f_{pe}$  : 유효 프리스트레스 ( $kgf/cm^2$ ),  $d_b$  : 강선의 직경 (cm)

### 3.5 균열모멘트 계산

콘크리트 부재의 균열은 인장응력이 콘크리트의 휨인장강도를 초과하는 경우에 발생하므로 PC 부재의 인장축 콘크리트 응력이 콘크리트의 인장강도와 같다는 조건으로부터 계산할 수 있다. 콘크리트의 휨 인장강도  $\sigma_r$ 은 콘크리트 구조설계 기준에 의해  $2\sqrt{\sigma_{ck}}$ 로 하였으며 PC부재의 균열모멘트는 식 (2)와 같다.

$$M_{cr} = \left( \frac{P_e}{A_c} + f_r + \frac{P_e \cdot e}{Z} \right) \times Z \quad (2)$$

여기서,  $M_{cr}$  : 균열 모멘트 ( $kgf \cdot cm$ ),  $P_e$  : 유효프리스트레스량(kgf),  $Z$  : 단면계수 ( $cm^3$ )

$e$  : 편심 (cm),  $A_c$  : 콘크리트 단면적 ( $cm^2$ ),  $f_r$  : 콘크리트의 휨 인장강도 ( $kgf/cm^2$ )

### 3.6 극한모멘트 계산

PC침목의 설계시에는 극한하중 상태에서의 극한 안전도를 계산하여 검토를 하여야 한다.

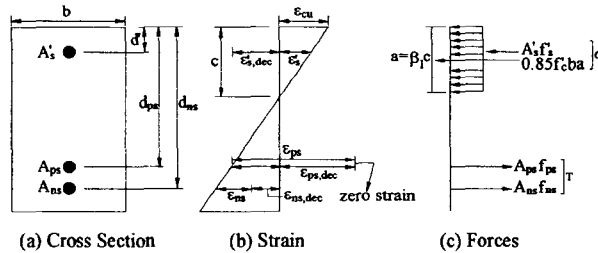


그림 4. 극한 강도 상태 때의 콘크리트 응력의 분포

#### 1) PS강재의 응력 ( $f_{ps}$ ) 계산

PS강재의 응력은  $f_{pe} \geq 0.5 f_{pu}$  조건을 만족할 때 콘크리트 구조설계기준에 따라 근사적으로 계산한다.

$$f_{ps} = f_{pu} \left( 1 - \frac{\gamma_p}{k_1} \rho_p \frac{f_{pu}}{f_{ck}} \right) \quad (3)$$

여기서  $f_{ps}$  : PS강재의 응력 ( $kgf/cm^2$ ),  $f_{pu}$  : PS강재의 극한 강도 ( $kgf/cm^2$ )

$\gamma_p$  : 보통의 응력제거 강선인 경우 ( $f_{py}/f_{pu} \geq 0.85$ )에 0.4이다.

$$k_1 = f_{ck} > 280 kg/cm^2 \text{ 이면 } k_1 = 0.85 - 0.05 \left( \frac{f_{ck} - 280}{70} \right)$$

$\rho_p$  : PS강재비 ( $A_p/A_c$ )

2) 침목의 극한 저항 모멘트

PC침목에는 PS 강재 외에 별도의 강재 외에 별도의 인장철근이나 압축철근이 배근되어 있지 않으므로 PS 강재가 인장에 대해 저항하는 것으로 보고 극한 저항모멘트를 계산한다. 이때 콘크리트의 등가 사각형 응력깊이  $a$ 는 식 (4)와 같다.

$$a = \frac{A_p \cdot f_{ps}}{0.85 \cdot f_{ck} \cdot b} \tag{4}$$

여기서  $a$  : 콘크리트의 등가 사각형 응력깊이 (cm),  $A_p$  : PS 강재의 단면적 (cm<sup>2</sup>)

$b$  : 부재의 폭 (cm),  $f_{ps}$  : PS강재의 응력 (kgf/cm<sup>2</sup>),  $f_{ck}$  : 콘크리트의 압축강도 (kgf/cm<sup>2</sup>)

이때 극한 저항 모멘트는 식 (5)과 같다.

$$M_n = A_p \cdot f_{ps} \left( d_p - \frac{a}{2} \right) \tag{5}$$

3.7 안전율의 계산

레일직하부 및 침목중앙부에서의 균열 모멘트는 침목의 설계모멘트보다 크다. PC 휨부재는 각 하중단계에 대한 응력들이 허용응력이하러야하고 또 파괴에 대하여 필요한 안전율을 가지는가를 확인해야한다. 이때 외부하중에 의한 모멘트는 사하중의 영향이 극히 작고 열차하중에 의한 영향이 지배적이기 때문에 외부하중은 모두 활하중으로 볼 수 있다. 이 활하중에 대한 하중계수  $\gamma_L$ 은 1.8이고, 프리스트레스 콘크리트 휨부재의 강도감소계수  $\phi$ 는 0.85이다. 외부하중에 의한 모멘트에 대한 극한 저항모멘트의 안전율은 다음 표 5와 같다.

표 5. 극한 저항모멘트의 안전율

구분	레일직하부	침목중앙부
안전율	$S.F. = \frac{\phi \cdot M_n}{\gamma_L \cdot M_P}$	$S.F. = \frac{\phi \cdot M_n}{\gamma_L \cdot M_N}$

4. 침목 자동화설계 프로그램

침목 자동화 설계 프로그램은 침목을 제작하고자 하는 사용자가 단면의 종류를 선택하고, 침목 단면의 치수와 콘크리트의 압축강도, 사용하려는 강선의 종류를 입력하면 침목 단면의 성질을 계산하고 이를 분기기 내에 있는 침목에 대해 설계 모멘트를 산정한다. 위의 과정을 통해 나온 설계 모멘트로 단면설계의 과정을 거쳐 최종 설계도면을 보여준다.

4.1 자료 입력

사용자가 선택하게 되는 침목의 단면은 가장 많이 사용되는 세가지의 단면으로 구성하였다.

4.2 침목단면 설계

다음의 그림 6은 위에서 입력한 단면 자료들을 바탕으로 단면설계를 거쳐 가장 적절한 단면을 보여주는 화면이다. 여기에서는 각각의 침목에서 모멘트 정보를 알 수 있으며 해당 침목을 선택하면 열차하중이 주어질 때 침목에서의 모멘트도와 그 때의 최대·소 모멘트와 설계 정·부모멘트를 확인할 수 있다. 또한 이 설계정보를 바탕으로 침목단면을 자동설계하고 사용자가 쉽게 알아볼 수 있도록 설계단면도를 확인하도록 하였다.

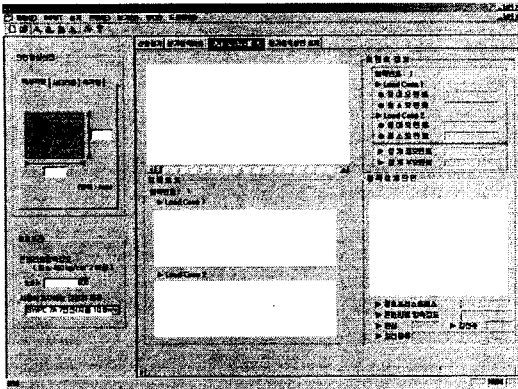
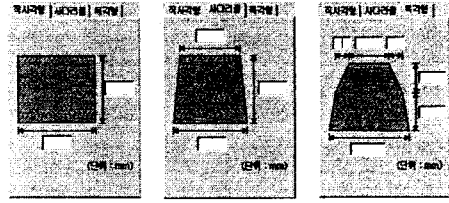
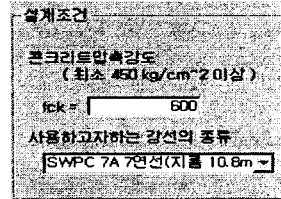


그림 5. 침목 자동화설계 프로그램 초기 화면



(a) 직사각형 (b) 사다리꼴 (c) 육각형



(d) 압축강도 및 강선종류  
그림 6. 입력 자료

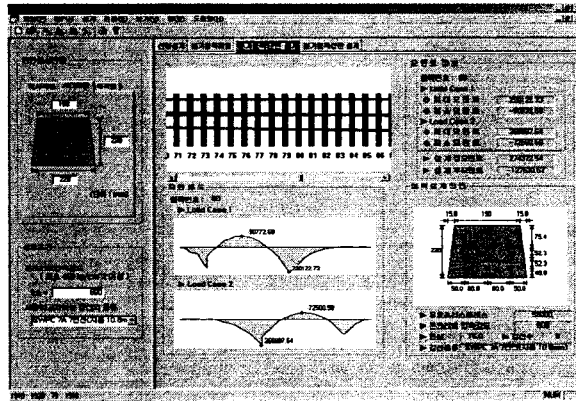


그림 7. 침목 자동화설계 프로그램 결과 화면

#### 4. 결론

본 연구에서는 침목의 생산자가 단면의 기본적인 정보만을 가지고 입력하면 분기기 상에 있는 길이와 하중위치가 변화하는 모든 침목의 설계조건을 고려해 자동으로 단면을 산정할 수 있도록 만든 프로그램으로 기존에 설계자가 변화하는 분기침목의 길이에 맞추어 개별적으로 수동설계하는 방식에서 탈피하여 좀더 신속하고 간편하게 설계할 수 있도록 개발하였다. 이 프로그램을 통하여 고속분기기 PC 침목을 보다 효율적이고 경제적으로 설계할 수 있으며, 특히 그래픽화하여 간단한 클릭으로 모든 설계계산이 완료되어 출력되므로 이에 큰 의의가 있다.

#### 참고문헌

1. (1999) 철도교 설계 기준, 철도청
2. (1994) 고속철도 PC 침목설계 표준 시방서(안), 한국고속철도 건설공단