

프리스트레스트 프리캐스트 게르버 U형보의 최적설계

Optimum Design of Prestressed Precast Gerber-U Beams

김 인 규* 박 현 석* 이 종 민** 조 상 규*** 유 승 룡****
Kim, In Gyu* Park, Hyun Suk* Lee, Jong Min** Cho, Sang Gyu*** Yu, Sung Yong****

ABSTRACT

The cost on transmission and election of precast concrete members largely depends on the weight of them. In this study, the weight of prestressed precast beam could be reduced by control the section and prestressing force to meet the required strength on the basis of the optimum process. The top and bottom concrete stress of the section considered is required to check according to each construction step for this process. The original rectangular beam weight could be reduced up to 50 ~39% due to the development of a U-beams from the optimum process.

1. 서 론

1.1 연구개요

본 연구는 게르버보 시스템의 중앙부 프리캐스트 프리텐션 보의 자중을 최소화 할 수 있는 직사각형 U-beam 단면을 제안하였다. 국내실정과 규준을 만족하는 '장스팬 프리스트레스트 PC골조 구조시스템' 개발을 위한 연구¹⁾로써, 20~25m의 게르버보의 내부보 분재 길이는 11.5~14.5m로 할 수 있다. 그 자중은 10~20ton으로써, 실물크기 구조물의 운송 및 시공에서 경제적이지 못하다. 본 연구에서 최적설계에 의하여 "최소 자중 U-beam 단면"을 제안하였다. 제안된 게르버 U형보 단면은 프리스트레스트 PC골조 구조시스템에 의한 건물 구조설계의 합리화를 도모하고 구조체의 안전성과 경제성을 높이는 것을 목적으로 한다.

1.2 단면계획

Fig. 1의 U타입 단면은 최적이론에 의하여 휨 응력의 구속을 받는 단면의 크기와 초기 긴장력의 크기 등을 결정하여 부재의 자중을 최소화하여 운송 및 시공의 편리성을 극대화하도록 도모하였다.

프리스트레스트 프리캐스트 부재는 1) 프리캐스트 보에 긴장력이 도입될 때, 2) 합성단면에 추가 고정하중이 재하될 때, 3) 합성단면에 추가 고정하중과 적재하중이 재하될 때의 각 시공단계별 응력 검토가 필요하다. 본 연구에서는 각 단계별 응력 제한치를 만족하는 최소자중 프리캐스트 U형보를 최적설계에 의하여 평가하여 보았다

*정회원, 동국대학교 대학원 석사과정

**정회원, 삼연 PEC(주) 과장

***정회원, 신화엔지니어링 소장

****정회원, 동국대학교 건축공학과 교수

이 경우 가장 주된 문제는 강도설계 기준 범위 내에서 각각의 시공단계에서 응력 제한치를 초과하지 않는 범위 내에서 프리캐스트 보의 깊이(x(6)-x(5))를 어느 한계까지 절단할 수 있는가에 있다(그림 1 참조).

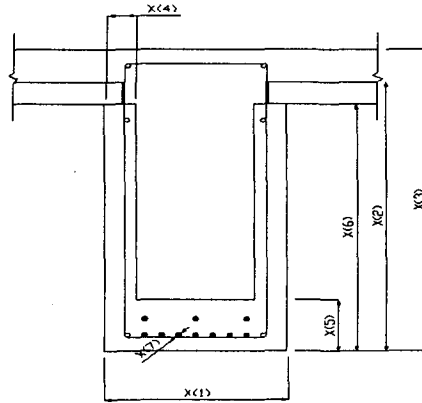


그림 1 U-beam 단면

2. 최소자중 게르버 U형보 개발

2.1 개발개요

본 연구에서는 최적이론²⁾을 적용하여 휨 응력의 구속을 받는 단면의 크기와 초기 긴장력의 크기 등을 결정하여 부재의 자중을 최소화하여 운송 및 시공의 편리성을 극대화하는데 있다. 설계 하중으로는 보와 현장타설 토핑콘크리트, Half Slab의 자중을 합한 고정하중과 추가 적재하중은 일반 매장을 고려하여 적용하였다. 각 스패에 따른 설계하중은 표 1과 같다.

표 1 각 스패에 따른 설계하중 (기준층)

스 팸		기둥 크기 (cm)	설 계 하 중				f_{ci} (kg/cm ²)	f_{ck} (kg/cm ²)	f_{pu} (kg/cm ²)
전체 스패 (m)	설계 스패 (m)		W_o (kg/m)	W_{holl} (kg/m)	W_{sd} (kg/m ²)	W_L (kg/m ²)			
5×18	5×10.4	40×40	296.3	421	350	500	300	420	18,900
5×20	5×11.5	40×40	349.0	429					
5×25	5×14.4	50×50	462.2	776					

여기서,

- W_o : 프리캐스트 보의 자중
- W_{holl} : 추가 고정하중 (중공 부분의 Topping)
- W_{sd} : 추가 고정하중 (Topping, Half slab 등)
- W_L : 적재하중
- f_{ck} : 콘크리트의 압축강도
- f_{ci} : 초기 콘크리트 압축강도
- f_{pu} : 긴장재(강선)의 극한강도

2.2 단면개발

최적이론을 적용하여 최소 자중을 위한 단면, 강선과 철근의 배근, 콘크리트강도등 변수의 적정치를 구할 수 있다. 최적이론에 의하여 국내 적용 가능한 스펠(18m, 20m, 25m)에 대한 각각의 U형보의 단면 최적화 설계를 제시하려 한다.

U형보의 형상은 다음의 3가지 목적으로 개발되었다. 1) 운송의 효율성과 시공시 10ton 이하용량의 크레인을 적용하여 조립할 수 있도록 프리캐스트 자중을 최소화한다. 2) 하단면은 강선의 배치를 위한 충분한 면적을 갖으며, 기둥과 동일한 크기를 갖는다. 3) 웨브는 운송 및 시공시 파단을 막을 수 있는 충분한 폭을 갖는다.

프리스트레스트 부재로서, 필요한 프리스트레스 강선수는 부재의 길이나 작용하중에 의하여 결정된다. 강선이 일직선으로 놓여진 프리스트레스 보는 절곡강선 보에 비하여 시공이 편리하며 경제적이므로 본 연구에서는 직선형 강선을 배근하였다^{3),4)}.

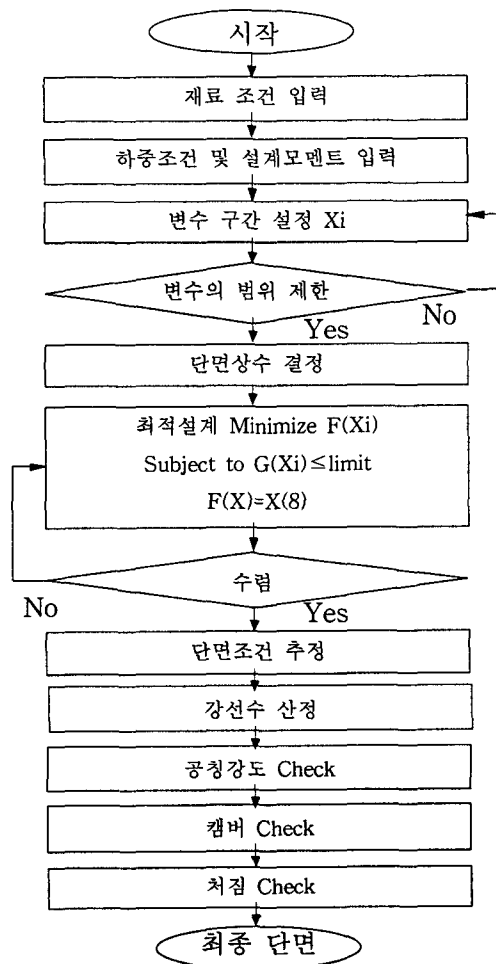


그림 2 게르버 U형보의 최적화 단계

2.3 최소자중 게르버 U형보의 최적설계

2.3.1 변 수

프리캐스트 단면의 보의 하부폭은 기둥 폭 크기를 적용하였다. 프리캐스트 단면의 크기는 일반 RC 보의 높이를 상한값으로 하였고, 프리캐스트 단면에서 하부로부터 중공 부분까지의 거리는 강선이 배근될 수 있는 하한값과 상한값을 두어 제한하였다. 따라서 본 연구에서 고려한 변수는 다음과 같고 그림 1에 도시되어 있다, 그림 2는 이를 고려한 최적화 단계이다.

- X(1) - U형보의 하부 폭
- X(2) - Half Slab를 포함한 보 높이
- X(3) - 타설 후 보의 최종 높이
- X(4) - PC 단면의 한 쪽면 상부 폭
- X(5) - PC 단면 하부에서 중공이 시작되는 면까지의 거리
- X(6) - PC 단면의 보 높이
- X(7) - 강선의 초기 긴장력 (P_i)
- X(8) - PC 보(U형 보)의 자중

2.3.2 수식 모델

본 최적화 문제에는 6개의 단면치수 구속과 2개의 강선수 구속을 갖고 있으며, 이는 ACI 318 - 99 규준⁵⁾에서 제시하는 허용응력과 단면의 기하학적 정의에 의해서 구성된다. ACI 시방서에 의해서 단면의 상면과 바닥 면에서의 압축응력과 인장응력이 허용 값을 초과하지 않도록 하며, 각각의 시공단계에서 응력은 보의 중앙과 단부에서 검증된다.

12개의 허용응력에 대한 규정은 앞에서 언급한 6개의 단면치수 구속과 2개의 강선수 구속을 더하여 추가적인 구속을 제공한다. 수식 모델은 아래 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } F(X) \\ & \text{subject to} \\ & G_i(X) \leq \text{limit} \end{aligned} \quad (2)$$

목적함수는

$$F(X) = X(8) \text{의 최소화}$$

처음의 8가지 구속(단면치수와 강선 구속)은 아래 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} G(1) &= X(4) \geq 7 \text{ cm} \\ & X(4) \leq 14 \text{ cm} \\ G(2) &= X(5) \geq 15 \text{ cm} \\ & X(5) \leq 49.5 \text{ cm} \\ G(3) &= X(6) \geq 40 \text{ cm} \\ & X(6) \leq 120 \text{ cm} \\ G(4) &= X(7) \geq 14,347 \text{ kg} \\ & X(7) \leq 258,249 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3)$$

시공단계에서 보의 중앙과 보의 끝에서의 각각의 압축응력과 인장응력에 대한 제한은 다음과 같다.

1) 긴장력 도입시

프리캐스트 콘크리트 보에 긴장력이 도입될 때, 상·하부면에서 응력제한은 다음과 같다.

a) 중앙부

$$\text{상부 } G(5) = -M_o/S_t - P_i/A_c + P_i \times e_t/S_t \leq 0.8\sqrt{f_{ci}} \quad (4)$$

$$\text{하부 } G(6) = M_o/S_b - P_i/A_c + P_i \times e_t/S_b \geq 0.6f_{ci} \quad (5)$$

b) 단부

$$\text{상부}G(7) = - P_i/A_c + P_i \cdot e_1/S_t \leq 1.6\sqrt{f_{ci}} \quad (6)$$

$$\text{하부}G(8) = - P_i/A_c - P_i \cdot e_1/S_b \geq 0.6f_{ci} \quad (7)$$

2) 합성 단면에 추가 고정하중이 재하될 때

a) 중앙부(근사값)

$$\text{상부}G(9) = - M_d/S_{tc} - P_e/A_{cc} + P_e \times e_2/S_{tc} \geq 0.45f_{ck} \quad (8)$$

$$\text{하부}G(10) = M_d/S_{bc} - P_e/A_{cc} + P_e \times e_2/S_{bc} \leq 1.6\sqrt{f_{ck}} \quad (9)$$

b) 단부

$$\text{상부}G(11) = - P_e/A_{cc} + P_e \cdot e_2/S_{tc} \leq 1.6\sqrt{f_{ck}} \quad (10)$$

$$\text{하부}G(12) = - P_e/A_{cc} - P_e \cdot e_2/S_{bc} \geq 0.45f_{ck} \quad (11)$$

3) 합성 단면에 추가 고정하중과 적재하중이 재하될 때

a) 중앙부(근사값)

$$\text{상부}G(13) = - M_t/S_{tc} - P_e/A_{cc} + P_e \times e_2/S_{tc} \geq 0.6f_{ck} \quad (12)$$

$$\text{하부}G(14) = M_t/S_{bc} - P_e/A_{cc} + P_e \times e_2/S_{bc} \leq 1.6\sqrt{f_{ck}} \quad (13)$$

b) 단부

$$\text{상부}G(15) = - P_e/A_{cc} - P_e \cdot e_2/S_{tc} \leq 1.6\sqrt{f_{ck}} \quad (14)$$

$$\text{하부}G(16) = - P_e/A_{cc} - P_e \cdot e_2/S_{bc} \geq 0.6f_{ck} \quad (15)$$

여기서,

M_t : 전체 고정하중 및 적재하중에 의한 보중앙 휨모멘트
 M_d : 보와 현장타설 고정하중에 의한 보중앙 휨모멘트
 M_o : 보의 자중에 의한 보중앙 휨모멘트
 S_b : 프리캐스트 단면의 하단에 대한 단면계수
 S_t : 프리캐스트 단면의 상연에 대한 단면계수
 S_{bc} : 합성 단면의 하단에 대한 단면계수
 S_{tc} : 합성 단면의 상연에 대한 단면계수
 P_i : 강선의 초기 긴장력,
 P_e : 강선의 모든 손실 후 긴장력
 A : 콘크리트의 단면적,
 e : 강선의 편심거리
 f_{ck} : 콘크리트의 압축강도
 f_{ci} : 초기 콘크리트의 압축강도

2.3.3 최적설계 결과

스팬에 대한 최적설계 결과는 표 2, 3과 같다. 1항의 전체스팬에 대한 중앙 단순보의 스패는 2항에 도시되었다. 보하단은 3항의 기둥크기와 일치한다. 이 결과는 5.0m를 L_2 길이로 한 18, 20, 25m span 게르버보의 중앙보를 위한 결과이다.

표 2 게르버 보 중앙분재 최적 설계결과 I

(1) 전체스팬 ($L_1 \times L_2$) (m)	(2) 설계스팬 ($L_1 \times L_2$) (m)	(3) 기둥 사이즈 (cm)	(3) 하부폭 (cm)	(5) 프리캐스트 단면하부에서 중공까지 깊이(cm)	(6) 프리캐스트 단면의 전체 깊이 (cm)	(7) 프리캐스트 단면의 상부웹브폭 (cm)	(8) 강선 수 (ea)	1단 최대 강선 배근수 (ea)	하부 인장근	자중 (t)
18 × 5	10.4 × 5	40×40	40	15	65	7	8	7	2-D ₂₅	3.22
20 × 5	11.5 × 5	40×40	40	15	77	7	9	7	2-D ₂₅	4.03
25 × 5	14.4 × 5	50×50	50	15	100	7	12	9	2-D ₂₅	6.67

표 3 게르버 보 중앙분재 최적 설계결과 II

전체스팬 (L ₁ ×L ₂) (m)	설계스팬 (L ₁ ×L ₂) (m)	기둥 사이즈 (cm)	휨강도 (t·m)	Camber (cm)	준공시 처짐 (cm)	사용하중시 처짐 (cm)	극한하중시 처짐(집중하중) (cm)
18 × 5	10.4 × 5	40×40	119.290	1.533	0.849	0.805	-14.707
20 × 5	11.5 × 5	40×40	156.033	1.808	0.967	0.914	-18.903
25 × 5	14.4 × 5	50×50	248.627	2.131	0.866	0.808	-21.161

2.3.4 단면비교

표 4는 최적설계에 의한 U-beam과 그와 같은 면적의 직사각형보의 무게를 비교한 표이다. 표 4에서 알 수 있듯이 10m스팬까지는 제안된 U형보는 직사각형보의 50%정도의 무게 감축을 보여준다. 그러나 스패 12.5m에서 두 보 사이의 무게차이 비는 약 39%로 더욱 커짐을 알 수 있다.

표 4 직사각형 RC보와 비교한 U-beam 무게

무게/스팬 (보 크기)	7.5m	10m	12.5m
		10.4×0.65×0.4	11.5×0.77×0.4
직사각형보	6.5 ton	8.5 ton	17.3 ton
U-보	3.22 ton	4.03 ton	6.67 ton

3. 결 론

본 연구에서 기존의 직사각형 보의 슬래브 시스템을 개선할 수 있는 게르버 U형보 단면에 대하여 최적설계를 하였다. 최적설계 결과 다음 결론을 얻을 수 있었다.

1) 최적설계에 의해 제안된 U형 PC보는 기존의 직사각형 단면과 유사한 강도와 사용성에서, 직사각형 단면보다 50~39%까지의 자중감축이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 동국대학교, "프리스트레스를 도입한 장스팬 PC골조 구조시스템의 개발", 건설교통부 1년차 보고서, 2000.
2. 유승룡, 민창식, "프리스트레스트 프리캐스트 더블 티형보의 최적설계" 콘크리트학회논문집, 제11권 6호, 1999년 12월.
3. PCI Design Handbook, Fifth Edition, Chicago, Illinois, 1999.
4. Arthur H, Nilson, "Design of Prestressed Concrete", Second Edition, Wiley, 1987.
5. ACI 318-99, "Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-99)", Detroit, Michigan.