분절형 CFT부재를 이용한 이동식 프리텐션 제작대의 개발 및 활용

이두성* · 김태균** · 이성철***

Lee, Doo Sung*, Kim, Tae Kyun**, Lee, Sung Chul***

Development and Field Application of Portable Tensioning System Using Segmental CFT Member

ABSTRACT

Pretension PSC (Prestressed Concrete) members are subjected to a certain limit of size as they are generally produced in the off-site plant and transferred to the site due to the large scale of the product on system. In this study, a portable pretensioning production system has been developed, which allow us to apply the pretension method on site. Considering that a 50m span PSC girder using the pretension method requires a pressing device to endure a large jacking force, the portable pretension production system has to ensure safety against such a large pretension jacking force. In this study, the portable pretensioning system to produce a 50m span pretension girder was manufactured by using CFT (Concrete Filled steel Tube) members. In order to understand the stability of the system and the behavior of the elements, a static loading test was conducted and the stability of the proposed portable pretensioning production system was confirmed. The developed portable pretension system was applied to several construction sites and was investigated the problems on site. During the pretension girder and slab members that was produced by this pretension system in construction site, it has be found the several advantages such as simple fabrication processes, reduction of prestress-loss, and a decrease of 15% compared with the fabrication cost of post-tension girder. After due consideration of the problems, this portable pretension system will be improved.

Key words : Pretension method, Transportable tensioning system, CFT member, Field test, Constructability

초 록

프리텐션 공법으로 생산되는 부재는 제작대의 대형화에 따른 문제로 일반적으로 공장에서 제작되고, 이에 따라 운반상의 문제로 프리텐션 부재의 크기에 제한을 받게된다. 본 연구에서는 현장에서 프리텐션 공법을 적용할 수 있는 이동식 프리텐션 제작시스템을 개발하였다. 프리텐션 방식의 50m급 PSC 거더를 제작하기 위해서는 높은 압축력에 대해 시스템이 지속적으로 저항해야 한다. 따라서 이동식 제작시스템은 긴장력에 대해 좌굴안정성을 확보해야 한다. 본 연구에서는 50m 길이의 프리텐션 거더를 제작할 수 있는 이동식 제작시스템을 CFT부재를 이용하여 제작하였다. 시스템의 안전성과 구성부재의 거동을 파악하기 위해 정적가력시험을 수행하여 이동식 프리텐션 제작시스템의 안정성을 입증하였다. 이동식 프리텐션 제작시스템은 다양한 프리텐션 부재 제작현장에 투입되어 시공성이 검토되었다. 공장이 아닌 현장에서 이동식 프리텐션 제작시스템을 통해서 생산되는 프리텐션 부재는 포스트텐션 공법에 비해 공정이 단순하고, 프리스트레스 손실이 적으며, 정작장치 등이 불필요하다는 장점을 현장에서 효율적으로 활용할 수 있게 되었다.

검색어 : 프리텐션 방식, 이동식 제작대, CFT구조, 현장실험, 시공성

* 정회원 · 교신저자 · (주)홍지 기술연구소 공학박사 (Corresponding Author · Hong-G Reserch Institute Director · Lds1970@hgdc.com)

** 정회원 · 동국대학교 건설환경공학과 박사과정 (ceo@hgdc.com)

*** 정회원 · 동국대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사 (sclee@dgu.edu)

Received October 22, 2013/ revised December 30, 2013/ accepted March 31, 2014

1. 서론

PSC (precast prestressed concrete이하 PSC로 명기) I형 거더(girder)교는 단면의 효율이 높고 자중이 크지 않아서 하부구조에 부담을 덜 줄뿐만 아니라 거더 자체의 강연선 및 철근의 사용량을 줄일 수 있어서 경제성 또한 확보되는 매우 우수한 형식의 교량이다. PSC 거더교는 주로 포스트텐션(post-tension) 공법이 적용되어 왔다. 포스트텐션 공법은 현장에서 유연하게 공정을 적용할 수 있다는 장점을 갖고 있으나, 쉬스(sheath)관 설치에 따른 단면 활용률의 감소, 긴장력의 비교적 높은 오차, 정착장치 및 쉬스관 설치, 그라우팅과 같은 후속작업에 따른 비용발생, 그리고 일반적으

로 나타나는 그라우팅(grouting)의 불완전함에 따른 내구성 감소 등의 문제점을 갖고 있다. 이에 반해 프리텐션(pre-tension) 공법은 쉬스관의 설치가 없고 강연선을 직선으로 배치하여 시공오차를 최소화 할 수 있으며, 철근조립이 단순하여 제작의 간결성이 있다. 또한 정착구, 쉬스관, 그라우팅 그리고 단부보강철근 등이 불필요하여 공사비를 절감할 수 있는 장점을 갖고 있다.

프리텐션 방식은 Fig. 1과 같이 PS강연선을 미리 긴장한 상태에서 콘크리트를 타설하고, 콘크리트 경화 후에 PS강연선과 콘크리트 사이의 부착력에 의해 콘크리트 단면에 압축력을 도입하는 방식이다. 따라서 강연선에 도입되는 큰 프리스트레스(prestress)력을 지지해야하는 규모가 큰 반력대(Fig. 2)가 요구된다.

프리텐션 방식은 일반적으로 공장에서 제작되어 현장으로 운반되므로 운반길이 및 중량에 제한을 받아 소형부재에 국한되어 왔다. 특히, 길이 및 중량이 매우 큰 교량부재의 거더, 건축구조물의 보 부재 또는 장기간의 슬래브부재는 공장에서 제작하는 프리텐션 방식을 적용하는 것이 어려웠다. 물론, 프리텐션 방식으로 부재를 현장에서 제작하여 이런 문제를 해결할 수 있지만 실제 프리텐션 방식에 의해 제작되는 구조체는 반력대, 반력지주, 압축패드 등의 고가의 제작장치 및 설비가 필요하여 현장에서 프리텐션 방식을 적용하기에는 어려움이 있으며 경제성이 떨어져 거의 적용되지 않고 있는 실정이다.

기존 프리텐션 공법의 고질적인 단점이었던 현장적용능력을 제고하기 위해서 기존 프리텐션 공법의 한계인 반력대 설치와 운행제한 조건을 해결하여 25m이상의 거더를 현장에서 제작 가능토록하고 현장에서 프리텐션 장점을 그대로 취할 수 있는 Fig. 3과 같은 이동식 프리텐션 제작시스템을 개발하였다. 이동식 프리텐션 제작시스템은 높은 축방향력에 대해 단면효율이 가장 우수한 부재인 CFT (concrete filled steel tube이하 CFT로 명기)를 반력대의 주부재로 사용하였으며, 현장으로의 운반 및 조립 등에 있어서 편리성 등을 고려하여 모든 부재를 고장력볼트를 이용하여 연결이 가능하도록 제작하였다.

본 연구에서는 현장에서 이동식 프리텐션 제작시스템을 안정적으로 적용하기 위한 구조안정성을 현장재하시험을 통해 확인하고

Fig. 1. Concept of Pretension System

(a) End Anchor Block

(b) Construction

Fig. 2. Outsized Existing Pretension System in Factory

Fig. 3. Concept of Portable Tensioning System

자 한다. 또한 구조안정성이 확인된 이동식 프리텐션 제작시스템을 현장으로 운송하여 지간 30m의 프리텐션 거더를 직접 제작하였으며, 현장에서 직접 이동식 프리텐션 제작대를 운용하면서 문제점을 찾아 확인하고, 개선하여 보다 진보되고 경쟁력 있는 이동식 프리텐션 제작시스템을 개발하고자 한다.

2. 기존 연구 및 기술에 대한 고찰

유럽을 포함한 해외의 경우, 대부분 차량적재물의 길이 및 중량에 대한 규정이 없기 때문에 양중 및 경제성을 고려하여 최대 25m 길이의 부재를 프리텐션 공법으로 공장에서 생산하고 있다(Kang et al., 2007).

국내에서는 도로법상 길이 16.0m 또는 총중량 40톤 이상의 적재물을 실은 차량의 통행을 제한하기 때문에, 교량용 거더와 같이 지간이 길고 도입긴장력이 큰 부재에 프리텐션 방식을 도입하기 위해서는 대형화된 고정식 반력대(Fig. 4)를 현장에 제작해야 하고 이는 곧 제작단가의 상승을 유발한다. 또한 시공이 완료된 후에 제작장의 원상복구 요구에 따라서 Fig. 4(c)와 같이 폐기물 처리 등으로 인해 자원의 낭비를 발생시키기 때문에 지금까지 프리텐션 방식의 장점을 교량에 적용하는 데 한계를 가져왔다.

공사비의 절감, 제작의 간결성, 시공오차의 최소화와 같은 프리

텐션 공법의 장점을 교량용 거더에 적용하기 위한 노력들이 진행되고 있다. 특히, 국내운송한계를 극복하기 위한 이동식 프리텐션 반력대를 개발하기 위한 연구가 몇몇 회사(Ma et al., 2010; Kim et al., 2010a, 2010b, 2010c; Kim et al., 2011; Byen et al., 2011; Yi et al., 2011; Kim et al., 2012; Kim et al., 2013)를 중심으로 수행되었다.

Fig. 5(a)는 Kim et al. (2011)에서 개발한 프리캐스트 콘크리트 블록을 이용한 프리텐션 반력대로 중량이 큰 콘크리트 블록(block)을 현장으로 운반하고 배치한 후에 콘크리트 블록 간에 비부착 강연선을 삽입, 연결하여 프리스트레스(prestress)를 도입하여 반력대를 완성하는 시스템이다(Ma et al., 2010). 경전선 철도 교량건설 공사에 도입되었으나, 전체적으로 시스템의 중량이 무겁고 작업자들의 활동이 어렵고 콘크리트 재료물성의 한계로 높은 긴장력이 요구되는 40m이상의 장지간 거더 제작에 한계가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 5(b)는 Kim et al. (2010)에서 개발한 이동식 프리텐션 제작시스템으로 50m급 PSC거더를 제작할 수 있도록 설계하였고, 바닥판 블록과 정착 블록, 긴장대 거더(단부거더, 중간거더)로 구성되는 데 각 구성요소의 운반을 고려하여 길이 12m이내, 무게 200kN 내외로 제작하였다. H형강(H-808x302x16x30) 2본을 용접하여 주압축재로 제작하였으며, 바닥판 블록을 제작하여 긴장대 거더와

(a) Fabrication of Basement

(b) Construction Complete

(c) Dismantlement

Fig. 4. Established Pretension Construction System on Construction Field

(a) Precast Concrete Bed System (Ma et al., 2010)

(b) Hollow Steel Box System (Kim et al., 2011)

Fig. 5. Portable Pretensioning System

체결하여 긴장력 도입 시 긴장대 거더의 좌굴을 억제하도록 하였다. (Kim et al., 2011) 일반적으로 박판을 사용하는 강관형 구조는 국부좌굴에 취약하여 보강재가 많이 사용되기 때문에, Fig 5(b)와 같이 강재량이 증가하여 전체적으로 중량 및 부피가 커지고 이는 현장에서 제작대 설치를 위한 투입비용의 증가를 가져오게 된다.

Ma et al. (2010)과 Kim et al. (2010a, 2010b, 2010c)에서 개발한 이동식 제작대는 모두 중량과 부피가 커서, 현장에서 제작대 설치를 위한 투입비용이 크고 거더생산을 위한 작업자들의 동선이 커지는 구조를 갖고 있다. 또한 Kim et al. (2010c)에서 개발 중인 시스템의 경우 시스템의 좌굴(Global buckling)을 위해 바닥 판 블록과 긴장대 거더를 볼트 연결하게 되는데, 현장과 같이 편평도가 좋지 않은 여건에서는 조립설치에 어려움을 겪을 수밖에 없다. 따라서 현장에서 운반, 설치, 해체가 용이한 이동식 프리텐션 제작시스템을 위해서는 중량을 최소화하고 볼트체결이 용이한 구조가 요구된다.

3. 이동식 프리텐션 제작시스템

3.1 시스템의 개요 및 특징

개발된 제작시스템은 현장에서 프리텐션 거더를 제작하기 위한 반력대와 유압실린더(cylinder), 지압판 등을 각각 운반 및 조립이 용이한 세그먼트(segment)로 제작하고 볼트 체결을 통해 현장에서 조립하도록 설계되었다. 특히 PS강연선에 긴장력을 도입 시 지지되

Fig. 6. Portable Pretensioning System

Table 1. Element Consisting of Portable Pretensioning System

	Dimensions	Remarks
CFT	D609-16T, $F_{ck}=60\text{MPa}$	$L=6.5\text{m} \times 7 \times 2$
End Anchor Block	H330×W950×L3040	Steel Plate lamination
End Crossbeam	H588×300×12/19	
Inter. Crossbeam	H350×350×12/19	Space: 3.5m
Oil Cylinder	$\delta(\text{stroke})_{\text{max}}=350\text{mm} / P_{\text{max}}=6,800\text{kN}$	

는 주압축부재를 단면대비 강성이 가장 우수한 콘크리트 충전강관 (Concrete-Filled steel Tube; CFT)으로 제작하였으며(AIK, 2004), 거더의 제작길이에 따라 종방향으로 연결되도록 분할하여 지간이 25~50m인 교량에 따라 길이조절이 가능하도록 하였다. 또한 Fig. 3과 같이 CFT 반력대와 지압판을 조립 설치하도록 하여 프리텐션 작업에 의한 구조적 하중을 충분히 지지할 수 있도록 설계하였으며, PSC부재 제작완료 후에 재사용이 가능하도록 하였다. Fig 6 and Table 1은 본 연구를 통해서 개발된 이동식 프리텐션 제작시스템 전경과 주요 구성부재를 보여주고 있다.

• 특징

- CFT부재의 적용으로 단면효율 극대화(중량 최소화)
- 분할된 부재로 제작하여 운반, 조립 그리고 해체가 용이하여 현장적용성 극대화
- 가로보 등을 이용한 좌굴에 대한 안정성 극대화
- 적층구조형식의 지압판으로 강연선 배치가 용이

3.2 시스템의 가력시험

높은 압축을 받는 시스템에서 가장 중요한 설계인자는 좌굴(buckling)이다. 본 연구에서 개발된 제작시스템은 강연선 긴장 시에 한 쌍의 CFT 단면이 높은 압축력을 받기 때문에 좌굴에 대해 충분한 안전성을 확보해야 한다. 시스템의 좌굴강도(stability)를 평가하기 위해 제작시스템의 단면강성비교를 통해 좌굴방향을 파악하고, 45m 길이의 프리텐션 부재를 제작할 수 있는 이동식 제작대를 운반 설치하여 현장재하시험을 실시하여 구조안정성을 검증하였다.

3.2.1 제작시스템의 설치

본 연구에서 개발된 반력대는 기본적으로 프리텐션 거더 45m까지 제작이 가능하도록 설계되었다. 6.5m 길이의 CFT 14본을 2열로 배치하여 45m 길이의 제작대를 구성하고, 시스템의 좌굴강성을 증대시키기 위해 중간에 가로보를 배치하였다. Fig. 7은 이동식 프리텐션 시스템을 조립하여 강선을 배치하고, 유압실린더를 이용 일괄긴장법으로 긴장력을 도입하여 좌굴안정성을 시험하는 절차를 보여주고 있다.

3.2.2 실험방법 및 계측

본 실험의 주목적은 제작시스템의 좌굴안전성에 관한 검증이므로, 45m 프리텐션 거더의 소요강선량을 계산하여, 강선만을 배치한 후에 긴장력을 도입하도록 하였다. 시험에 적용한 강선의 제원과 수는 아래와 같으며, 배치된 강선의 정렬을 위해 수행된 1차 가긴장의 신장량과 유압실린더를 이용한 본 긴장시의 도입된 실린더의 스트로크(stroke)를 기록하여 제작시스템에 도입된 총긴장력을 확인

Fig. 7. Field Test of Portable Pretensioning System

Fig. 8. Measurement Locations of Portable Pretensioning System

하였다.

- PS강연선 : SWPC 15.7mm - 66본
- 총긴장력 : $200\text{kN} \times 66\text{본} = 13,200\text{kN}$
- 총신장량 : $70\text{mm}(\text{1차 가긴장}) + 280\text{mm}(\text{본 긴장}) = 350\text{mm}$

이동식 프리텐션 시스템의 안전성을 평가하기 위하여 길이 45m의 강연선 66개를 긴장하였을 때 CFT 반력대와 지압판, 그리고 연결부 거동을 확인하였다. 게이지(gauge)의 측정위치는 단부와 중앙부에 변형률게이지를 4등분하여 부착하였으며, 단부가로보는 상하부에 부착하였다. 또한 지압판에는 상하부 측면에 변형률게이지를 부착하였다. 변위계는 단부와 중앙부에 수직, 수평으로 설치하였으며 지압판 하부에도 변위계를 설치하였다.

실험은 단계별로 긴장을 하며 긴장력 단계에 따른 변위 및 변형률을 확인 기록하였다. 이동식 제작시스템의 주요 계측위치를 Fig. 8에 표시하였다.

3.2.3 재하실험결과

3.2.3.1 가력시 시스템의 변위

Fig. 9는 이동식 프리텐션 제작시스템에서 주요 부재인 CFT 반력대의 긴장력 도입에 따른 약축인 수직변위를 각각 반력대별로 나타낸 것이다.

초기 긴장력 4,370kN(신장량 115mm)을 도입하였을 때 A_CFT 반력대는 제작대의 종점인 45m지점에서 상향으로 솟기 시작하여 13,200kN의 최종긴장력이 도입되었을 때 0.45mm의 상향변위가 변위계에서 측정되었다. B_CFT 제작대에서는 유압실린더가 설치된 시점부분에서 상향 변위거동을 보이는 것으로 나타났으며, 최종 긴장력이 도입되었을 때 0.3mm가 측정되었다. 중앙부에서는 상향 수직변위가 최대 0.53mm가 측정되었다.

측정된 변위결과는 CFT단면의 제원(지름 609mm)이나 부재의 길이(6.5m)에 비해 매우 작은 값으로 이동식 프리텐션 시스템의 좌굴이나 편심에 의한 휨변형에 의한 변위로 발생한 수치라기

Fig. 9. Vertical Displacements at Load Step

Fig. 10. Horizontal Displacements at Load Step

보다는 제작대 조립단계에서 볼트연결부에서 편차, 지반의 편평도에 의해 발생된 오차가 긴장력 도입에 따라 제작대가 자리를 잡는 과정에서 미소의 위치변화를 발생시켜 측정된 변위로 판단되었다.

따라서 제작시스템의 강연선 긴장실험 결과로부터 45m 프리텐션 거더를 제작할 경우에 최대 긴장력에 대해서는 2축방향(상향)에 대한 안정성은 충분히 확보되는 것으로 판단되었다.

Fig. 10은 긴장력 도입에 따른 CFT 반력대의 수평변위를 측정된 결과를 나타내고 있다. Fig. 10(a)는 A_CFT 반력대의 위치별 수평변위값으로 전체적으로 제작 시스템의 외측방향으로 변형을 보이고 있다. 시점과 종점은 단부가로보의 구속과 긴장력이 도입되는 위치로 강연선 내측으로 각각 최대 0.67mm과 0.4mm의 변형을 보이고 있으며 중앙부는 외측으로 0.07mm의 변형을 보이고 있다. Fig. 10(b)는 중앙부에서 A, B_CFT 반력대의 수평방향 변위를 비교한 것으로 그림에서 점선으로 표시한 것과 같이 강연선 외측이 서로 반대방향으로 변형을 보이는 것으로 나타났으며, 변위량은 좌우방향으로 모두 0.07mm의 변위량을 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 11. Vertical Displacement of End Anchor Block

Fig. 11은 PS강연선이 지압판의 수평도심축을 기준으로 비대칭으로 배치됨에 따라서 편심모멘트(moment)로 인해 발생할 수 있는 지압판의 변위를 측정하기 위해 지압판의 하부에 설치된 변위계로부터 측정된 수직변위 값이다. 그림에서 보이는 것과 같이

초기에 기울어 있던 지압판이 강연선의 긴장력 도입에 의해 수직으로 상승하며 자리를 잡아가는 것으로 판단된다. A7과 B7에서 측정된 최종변위는 각각 0.15mm와 0.58mm로 측정되었다.

긴장력 도입에 따른 수직 · 수평방향 변위를 확인한 결과 모든 변위는 1mm 이하의 변위량을 보여, 수직수평 방향 모두 안정적인 거동을 보였다. 따라서 이동식 프리텐션 시스템으로 경간길이 45m 이하의 거더를 제작하는데 매우 효과적일 것으로 판단된다.

3.2.3.2 가력시 시스템 요소의 변형률

중방향 변형률은 시점, 중앙부, 종점의 CFT 단면에서 변형률을 측정하였으며, 각 측정단면별로 변형률게이지는 대칭으로 4개씩 부착하였다. 측정된 모든 위치에서 안정적인 압축변형률이 측정되었다.

(a) A-CFT

(b) B-CFT

Fig. 12. Longitudinal Strains of the Center Point

최대변형률(Fig. 12)은 중앙부에서 측정되었으며, 이때의 변형률은 각각 약 $395\mu\epsilon$, 약 $365\mu\epsilon$ 로 측정되었다. 측정된 변형률은 일반적인 강재의 변형률 한계인 $2,000\mu\epsilon$ 의 약 1/5수준으로 도입된 긴장력에 비해 상당히 안전 측에 있는 것으로 분석되었다. 또한 CFT 반력대에 부착된 4방향 모두에서 압축변형률을 보이고 있어 좌굴에 대한 안전성 역시 확보되는 것으로 판단된다.

Fig. 13은 강연선이 정착되는 지압판에서 휨 인장 변형률을 측정한 결과이다. 그림에서 점선으로 나타낸 것과 같이 지압판의 하단은 인장변형을 보이고 있다. 이러한 결과는 단부지압판의 양단이 CFT에 의해 지지되어 중앙부에 분포하중을 받는 단순보와 같이 거동하여 휨인장응력이 발생하는 것이다. 그러나 45m 프리텐션 선 거더의 총도입 긴장력인 13,200kN에서 측정된 인장변형률이 약 $350\mu\epsilon$ 이며, 응력으로 환산시 70MPa로 SM490 강재의 허용 휨인장응력인 190MPa에 여유가 있음을 확인할 수 있다.

3.2.4 결과분석

축하중을 받는 부재의 초기변형량은 Perry-Robertson Formula (Eq. (1))에 의해서 산정할 수 있다(Timoshenko and Gere, 1963). CFT단면의 좌굴강도와 공칭휨강도를 산출하고, 도입긴장력을 산정하여 대입하면 기둥이 허용할 수 있는 초기변형을 알 수 있다.

$$\delta_{\max} = \frac{(1 - P/P_e)\phi M_n}{P} \quad (1)$$

여기서, P : total tensioning force, P_e : buckling strength of CFT member, ϕM_n : nominal bending strength of CFT member

Fig. 13. Strain at Side of End Anchor Block

Table 2. Peak Displacements of Portable Pretensioning System

Measuring Spot		Displacement (mm)				remarks
		Vertical		Horizontal		
		End	Center	End	Center	
Column	A_CFT	0.45	-	0.67	0.07	< 30mm
	B_CFT	0.30	0.53	0.40	0.07	< 30mm
End Anchor Block	Left (A7)	0.15		-		
	Right (B7)	0.58		-		

Table 3. Peak Strains of Portable Pretensioning System

Measuring Spot		Strain ($\mu\epsilon$)	Stress (MPa)	Remarks
Column	A_CFT	395	79.0	< $f_a=140\text{MPa}$
	B_CFT	365	73.0	
End Anchor Block	Top	295	59.0	< $f_a=190\text{MPa}$
	Bottom	350	70.0	
Connection Bolt		-70	-14.0	< $f_a=140\text{MPa}$

본 연구에서 설계된 CFT 반력대에 대한 허용초기변형은 120mm 산정되지만, 안전율을 고려하여 30mm 이내로 가정하였다. 따라서 가력시험을 통해서 측정된 변위(Table 2)는 이 같은 허용초기변형치보다도 매우 작은 값을 알 수 있다. 또한 각 주요부재의 응력을 환산한 결과 Table 3과 같이 허용응력(KRTA, 2010)에 1/2이하로 조사되어 표준화된 50m 프리텐션 거더를 제작함에 있어서 본 연구에서 개발된 이동식 제작대의 구조적인 안정성은 신뢰할 수 있다고 판단된다.

- Project: Improvement Project for improvement of flood damage on Hawpo River
- Project Owner: Kimhae City
- Name of Bridge: Kungok Kyo
- Type: Pretension Girder(New)
- Span of Bridge: 3@25m(Exist)+2@30m(New)=135.0m
- Depth of Girder: $h=1.74\text{m}$

Fig. 14. Geumgokgyo (before Construction)

Fig. 15. The Properties of Pretension Girder (in Geumgokgyo)

4. 이동식 제작시스템의 현장적용

4.1 프리텐션 거더의 현장제작사례

4.1.1 현장 여건 및 제한

해석 및 현장재하시험을 통해서 구조안정성이 검증된 이동식 프리텐션 제작대를 이용하여 교량현장에서 직접 30m길이의 프리텐션 방식의 거더를 시공하였다. 시공된 교량은 경상남도 김해시 군도 제9호선(생철~진영구간)에 위치한 급곡교로, 급곡교는 낙동강하류 지천에 위치한 교량으로 홍수 시에 범람으로 인한 피해로 인해 Fig. 14에 보이는 것과 같이 기존 교량에서 일부 거더만을 철거하고 부분 신설하는 교량으로 기존의 교각을 계속 사용해야 하는 조건을 갖고 있다. 또한 기존의 교대 위치를 후방으로 10m이상 이동시켜야 하는 조건을 갖고 있다. 기존교량은 25m 표준 PSC거더 5경간 교량이었는데, 이를 시점부 3경간은 25m의 기존거더를 활용하고 이후 2경간은 30m길이의 거더를 6본을 제작가설하도록 설계되었다.

Fig. 14에서 기존교각 P3을 사용하는 설계조건으로 인해 새로 제작된 거더의 길이는 30m이면서 거더중량은 기존의 25m 표준 PSC거더 중량을 넘어설 수 없었다. 따라서 기존 거더와 동일한 형고($h=1.74\text{m}$)를 유지하면서 거더의 중량을 최소화하기 위해서는 복부를 최소화하면서 하부플랜지(flange)의 단면을 최소화할 수 있는 거더 공법이 요구되었다(Fig. 15). 일반적으로 포스트텐션 방식 PSC거더의 경우, 쉬스관이 거더의 복부에 위치하기 때문에 복부두께를 감소시켜 중량을 줄이는 데 한계가 있으나, 프리텐션 거더의 경우 PS강선을 모두 하부플랜지에 직선 배치할 수 있기 때문에 복부두께($t_w=180\text{mm}$)를 최소화하여 거더의 중량을 최소

화할 수 있기 때문에 금곡교의 신설구간에 적합한 교량으로 선정되었다.

4.1.2 프리텐션 거더의 시공

프리텐션 거더를 제작하기 위해 Fig. 16과 같이 제작대를 감해서 금곡교 인근지역에 제작대를 운반 조립하였다. 제작대의 침하를 고려하여 제작장 바닥에 쇠석다짐을 실시한 후에 Fig. 16(c)와 같이 6.5m 길이의 CFT부재를 고장력 볼트로 조립/체결한 후에 제작대의 사중점부에 강판이 적층된 지압판을 CFT부재의 사중점부에 조립하였다. 제작대의 총길이는 32.5m 이었으며 총강선의 수는 32개로 6,400kN의 긴장력이 이동식 제작대에 전달되었다. 배치된 강연선은 모노잭(mono jack)을 이용하여 개별인장법으로 프리스트레스가 도입되었으며, 증기양생을 통해 익일 콘크리트 강도발현 후 강연선을 절단하여 거더 콘크리트에 프리스트레스를

도입시켰다. 제작된 프리텐션 거더는 크레인(crane) 2대를 이용하여 제작대에서 이적한 후 야적장으로 이동하였다.

현장에서 이동식 제작대를 이용하여 프리텐션 거더를 직접 제작하는 사례가 거의 없어, 현장기술자들이 많은 시행착오를 겪게 되어 최초 프리텐션 거더 1본을 생산하는 데 4일이 소요되었다. 그러나 이후 3~6본까지 제작하는 단계에서는 본당 제작일수가 2일 이하로 공장제작과 유사한 공정을 보였다.

4.2 이동식 프리텐션 제작대의 활용

제작된 이동식 제작대를 최초 금곡교 공사현장에 투입하여 완공한 후에 Fig. 17과 같이 곤지암의 보도교용 프리텐션 슬래브(slab) 제작, 평택의 자전거도로 교량구간에 프리텐션 슬래브교, 그리고 최근에는 군산시 새만금지역에 40m길이의 프리텐션 거더를 제작하는 현장에서 활용되어지고 있다. 이같이 다양한 형태의 PSC

(a) Carry the Fabrication System

(b) Assemble the Fabrication System

(c) Complete of Fabrication System

(d) Fitting the Steel Form

(e) Complete of Pretension Girder

(f) Construction Complete

Fig. 16. The Construction Flow of pretension Girder bridge (Geumgokgyo, Kimhae)

(a) Pretension Slab for Footway (in Konjiam)

(b) Pretension Slab for Bicycle Roadway (in Pyeongtaek)

(c) Pretension Girder (Okgyugu, in Gunsan)

Fig. 17. Application of Portable Pretensioning System

Table 4. Total Weights of Portable Pretensioning System

Length of Girder	Total Pretension Load of Girder	Dimension of CFT section	Allowable Compression Strength of CFT Section	Total Weight of CFT System
L=25m L=30m L=35m	4,500kN 5,100kN 5,700kN	D457-16T	< 7,530kN (OK!)	39.175tonf 48.861tonf 64.809tonf
L=40m L=45m L=50m	6,200kN 6,400kN 6,600kN	D508-16T	< 9,000kN (OK!)	80.788tonf 84.061tonf 84.501tonf

부재를 현장에서 프리텐션 방식으로 생산할 수 있다. 교량의 거더는 물론이고, 자전거도로나 보도교용 PC (precast) 슬래브, 그리고 최근 터널의 환기시스템으로 대두되고 있는 PSC 내화풍도슬래브 등의 현장제작에 활용할 수 있다. 또한 건축구조에서도 기둥을 최소화하여 내부공간을 보다 넓게 활용할 수 있는 장경간 구조부재를 생산하는 데에 활용할 수 있을 것이다.

4.3 시공성 및 개선사항

본 연구를 통해서 개발된 이동식 프리텐션 제작대를 모두 4개 현장(Fig. 17)에 투입하여, 프리텐션 부재를 생산하였다. 이동식 프리텐션 제작시스템이 투입되는 현장에 참여하여 시스템 운영 간에 문제점을 파악하고 다음과 같이 개선점을 도출하였다.

4.3.1 거더길이별 CFT단면의 최적화

프리텐션 거더의 경제성을 도모하기 위해서는 제작시스템의 초기제작비와 장비비를 포함한 운반, 조립, 해체비용을 최소화하는 것이 관건이 된다. 이에 거더길이별 CFT제작대의 최적화에 대해 검토하였으며, Table 4와 같이 35m이하 부재와 40~50m 부재에 대해서 각각 제작시스템을 마련하여 운영할 계획이다(AIK, 2004; KSSC, 2003).

4.3.2 CFT부재의 길이변경

주압축부재인 CFT의 길이는 D609 강관파일의 수급문제로 13m 1본을 1/2로 재단하여 제작되었으나 일반적으로 거더의 제작 길이가 5배수로 결정되기 때문에 차후에 제작되는 CFT부재의 길이는 5m단위로 제작하고, 추가적으로 거더 사중점 작업공간을 고려하여 1m단위의 세그먼트를 추가로 제작하고자 한다.

5. 결론

본 연구에서는 운송제약을 받던 장기간의 프리텐션 거더를 현장 제작하기 위해 개발된 이동식 프리텐션 제작시스템의 구조적인 안전성을 재하시험을 통해 입증하였으며, 이동식 프리텐션 제작시

스템을 현장으로 운송하여 30m 프리텐션 거더를 직접 제작하면서 시공간에 문제점을 파악하였다.

- (1) 프리텐션 제작대의 대형화 및 프리텐션 부재의 운반상의 제약과 같은 기존의 프리텐션 방식의 한계를 극복하고 현장에서 프리텐션 공법을 적용하기 위해 이동식 프리텐션 제작시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 현장에서 도입긴장력이 13,000kN 이상인 50m 지간의 프리텐션 거더를 제작 가능하도록 CFT반력대, 유압실린더 그리고 적층식 지압판 등을 운반 및 조립이 용이하도록 제작하였다. 개발된 이동식 프리텐션 제작시스템은 기존의 현장에서 제작되던 RC 반력대나 최근에 개발된 B사의 프리캐스트 구조나 J사의 강관형 구조에 비해 시스템의 전중량 및 제작 비용면에서 개선되고 현장에서 운반, 설치 그리고 해체를 용이하게 하여 재사용이 가능한 시스템이다.
- (2) 개발된 이동식 프리텐션 제작시스템의 구조안정성을 평가하기 위해 50m지간의 거더에 배치되는 강연선 66가닥을 모두 배치하고 13,200kN의 긴장력을 도입하였으며, 제작시스템의 주요 위치에서 측정된 수직수평방향 변위값을 Perry-Robertson Formula와 비교를 통해서 좌굴안정성이 검토되었다. 또한 각 부재에서 측정된 변형률은 약 $400\mu\epsilon$ 이하로 허용응력상태에서 변형률인 $700\mu\epsilon(f_a/E)$ 보다 작아서 안전성이 충분히 확보되고 있는 것으로 평가되었다.
- (3) 개발된 이동식 프리텐션 제작시스템을 현장에 투입하여, 교량용 프리텐션 거더를 직접 제작하였다. 거더 제작 상에 문제는 발생하지 않았다(Kim et al., 2013). 현장투입 후 최초 조립시에 바닥의 평탄성문제로 인해 어려움을 겪었으나, 거더 제작 간에 이동식 프리텐션 제작시스템에 구조적인 문제점은 발생되지 않았다. 다만, 프리텐션 제작시스템의 중량 및 길이가 커서 현장작업자들이 CFT 부재의 운반 및 조립단계에서 어려움을 겪었다. 이를 위해 보다 최적화된 CFT단면 검토를 통해, 프리텐션 거더의 길이별로 구분하여 제작운영하고자 한다.

본 연구를 통해서 개발된 이동식 프리텐션 제작시스템은 포스트

텐션 방식보다 경제성 및 구조적 우수성에도 불구하고 운송제한이라는 문제점을 갖고 있던 프리텐션 방식을 현장에서 자유롭게 활용할 수 있도록 초석을 마련했다고 할 수 있다. 추가적으로 발생될 수 있는 문제점들을 지속적으로 파악하고 개선해 나간다면 우수한 프리텐션 공법의 적용분야가 확충될 것으로 예상된다.

References

- Architectural Institute of Korea (AIK) (2004). *Concrete filled tube(CFT) structures* (in Korean).
- Byeon, J. S., Yoon, K. Y., Kim, J. S. and Kim, Y. H. (2011). "A basic study on the analysis model of portabler prestressing device for pretensioning PSC girders." *Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 6, pp. 77-82 (in Korean).
- Kang, J. H., Ha, D. J., Cho, K. S., Koh, J. Y. and Jeong, C. H. (2007). "A design and construction technology for long span precast concrete in central europe." *Proc. of Conference*, Architectural Institute of Korea, pp. 147-150 (in Korean).
- Kim, J. S. and Yoon, K. Y. (2012). "A study on buckling analysis of portable prestressing device for pretensioning PSC girders." *Journal of the Korea Academical-Industrial cooperation Society*, KAIS, Vol. 13, No. 1, pp. 419-424 (in Korean).
- Kim, J. S., Yoon, K. Y. and Kim, Y. H. (2010a). "Analytics study on the safety of 50m class portable prestressing bed." *Proc. of Conference*, KSCE, pp. 622-625 (in Korean).
- Kim, J. S., Yoon, K. Y. and Kim, Y. H. (2010b). "Evaluation on structural performance of portable prestressing bed." *Proc. of Spring Conference*, KAIS, pp. 645-648 (in Korean).
- Kim, J. S., Yoon, K. Y. and Kim, Y. H. (2010c). "Study on buckling analysis of portable prestressing bed." *Proc. of Spring Conference*, KAIS (The Korea Academia-Industrial Cooperation Society), pp. 461-465 (in Korean).
- Kim, J. S., Yoon, K. Y. and Kim, Y. H. (2011). "An experimental study on structural characteristics of 50m span portable prestressing bed." *Proc. of Spring Conference*, KAIS, pp. 280-283 (in Korean).
- Kim, T. K., Lee, D. S. and Lee, S. C. (2013). "A syructural performance test of a full-scale pretension PSC girder." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 5, pp. 174-1751 (in Korean).
- Korea Concrete Institute (2007). *Design specifications of concrete structures* (in Korean).
- Korea Road & Transportation Association (KRTA) (2010). *Road bridge design specifications* (in Korean).
- Korean Society of Steel Construction (KSSC) (2003). *Design and construction manual of concrete filled tube structures* (in Korean).
- Ma, H. W., Oh, H. C., Kim, I. G., Kim, Y. J. and Kim, K. T. (2010). "A study on pretension girder method using precast concrete bed system." *Proc. of Spring Conference*, KCI, pp. 463-464 (in Korean).
- Stephen P. Timoshenko, James M. Gere (1963). *Theory of elastic stability*, 2nd Ed., McGRAW-HILL, NewYork.
- Yi, G. S., Yoon, K. Y., Kim, J. S. and Kim, Y. H. (2011). "An experimetally fundamental study on development of portable prestressing devices for pretensioning PSC girders." *Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 6, pp. 61-66 (in Korean).