

# 콘크리트 충전 원형 강관을 이용한 터널강지보 합성부재의 휨거동 평가

마상준<sup>1</sup> · 최준혁<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>연구위원, 한국건설기술연구원, <sup>2</sup>교수, 부천대학교 토목공학과

## Evaluation of the Flexural Behavior of Composite Beam with Tunnel Steel Rib Support Using Circular Concrete Filled Steel Tube

Ma, Sang Joon<sup>1</sup>, Choi, Jun Hyeok<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Civil Engineering, Bucheon University, Bucheon, 14632, Korea

**Abstract** - The purpose of this study is to evaluate the strength and behavior of the composite member in case of concrete filled steel tube embedded in concrete for application concrete filled steel tube to steel rib support in tunnel. A total of six beam specimens were prepared for steel tube in-filled with plain concrete and aerated concrete, and static bending tests were performed. As a result, the member of concrete steel tube embedded with plain concrete showed higher strength than those with aerated concrete. However, it was found that the flexural strength of member with reinforcing bar around the steel tube is more influenced by the amount of the reinforcing bar than the type of the filled concrete.

**Keywords** - Concrete filled steel tube, Encased beam, Flexural behavior, Flexural strength

### 1. 서론

콘크리트 충전 강관 부재(CFT, Concrete Filled Steel Tube)는 강관에 의한 콘크리트 구속력으로 일반적인 강부재나 철근콘크리트 부재보다 높은 강도와 강성을 나타내기 때문에 압축력 또는 압축력과 휨을 받는 부재에 많이 사용되어 왔다. CFT 부재에 관한 연구는 1960년대부터 최근까지 여러 가지 조건에 대해 폭넓은 연구가 진행되어 왔다. Sherman<sup>[1]</sup>은 중공강관 부재에 대한 좌굴과 휨거동 연구를 수행하였고 Rangan *et al.*<sup>[2]</sup>은 편심하중을 받는 원형 CFT 기둥 부재의 거동과 강도 예측을 수행하였다. Goode *et al.*<sup>[3]</sup>; Roeder *et al.*<sup>[4]</sup>은 여러 하중 조건에 대한 실험을 수행하였고 유효강성

의 개념을 이용하여 강도예측식을 제안하였다. 국내에서도 CFT에 관한 연구는 기둥과 휨부재에 대해 많은 연구<sup>[5],[6],[7],[8],[9]</sup>가 진행되어 왔으며 CFT 부재를 거더로 활용하고 바닥판을 조합한 여러 형식의 복합 거더교량도 개발되고 있다.

본 연구는 CFT 부재를 거더로 활용하는 것과는 달리 CFT를 터널의 강지보재로 활용하는 것으로서, CFT 부재를 설치한 후 슛크리트를 타설하여 콘크리트에 CFT가 매립된 합성부재의 휨거동 분석에 관한 것이다. 터널의 강지보에는 아치형태의 라이닝을 따라 정모멘트와 부모멘트가 번갈아가며 발생하기 때문에 터널 지보재는 압축력과 휨모멘트가 동시에 작용하게 되며 슛크리트의 타설 후의 합성 부재는 충분한 강성이 발휘되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 CFT 부재를 터널의 강지보로 활용하기 위한 기초연구로서 CFT 부재가 콘크리트 내에 매립되어 합성부재로 거동하는 경우에 대한 부재의 강도와 거동특성을 실험적으로 평가하고 기존의 CFT 관련 강도 예측식의 적용성을 평가하고자 하였다.

콘크리트 슬래브 내에 CFT 부재가 매립된 보의 휨거동을 평가하기 위하여 두 종류의 강관을 대상으로 휨시험을 수행하였으며, CFT 강관 내부의 충전 방법으로 일반콘크리트와

Note.-Discussion open until February 28, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on June 23, 2017; revised August 5, 2017; approved on August 28, 2017.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-32-610-3311 Fax. +82-32-610-3224

E-mail. cjunh@bc.ac.kr

기포콘크리트를 충전한 경우에 대하여 휨거동을 분석하였다. 또한 콘크리트 슬래브 내에 철근이 보강된 경우 CFT 부재와 철근의 합성작용에 따른 강도 증가 효과를 분석하였으며, 소성응력분배법을 적용하여 단면의 휨강도 추정하여 기존 설계식의 적용성을 고찰하였다.

## 2. 휨 강도

CFT 부재에 대한 휨 강도의 계산 방법은 ACI<sup>[10]</sup>, AISC<sup>[11]</sup> 및 EC4<sup>[12]</sup>에 제시되어 있는데, ACI에서는 변형률적합법, AISC와 EC4에는 소성응력분배법을 이용한다. 기존의 연구 결과<sup>[4]</sup>에 의하면 ACI의 변형률적합법에 의한 계산 결과는 실험결과와 비교할 때 소성응력분배법보다 오차가 큰 것으로 나타나 있으며 설계결과는 보수적인 결과를 나타내는 것으로 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 CFT 매립보의 단면의 휨강도 계산을 위하여 소성응력분배법을 적용하였다.

CFT가 매립된 보의 강도 추정방법은 Fig. 1과 같다. 보의 중립축을 기준으로 하부의 인장응력 구간의 강관은 전 단면에 걸쳐 항복응력,  $f_y$ 에 도달한다. 콘크리트의 경우 압축응력 구간에서는 강관 내부의 콘크리트는  $0.95f'_c$ , 강관 외부의 콘크리트는  $0.85f'_c$ 의 압축강도를 가지며, 강관 내외부의 인장응력 구간의 콘크리트는 무시하였다.

보의 극한 휨강도,  $M_n$ 은 콘크리트 슬래브와 강관, 강관 내 콘크리트에 의한 모멘트로서 인장과 압축 요소로 구분하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_n = M_{slab,c} + M_{sc} + M_{cc} + M_{st} + M_{rt} \quad (1)$$

여기서,  $M_{slab,c}$ 은 강관 외부의 콘크리트 슬래브의 압축력에 의한 모멘트,  $M_{sc}$ 는 강관의 압축영역에 의한 모멘트,  $M_{cc}$ 는

강관 내부의 압축영역의 콘크리트에 의한 모멘트,  $M_{st}$ 는 강관의 인장영역에 의한 모멘트,  $M_{rt}$ 는 강관 외부의 인장철근에 의한 모멘트이다.

각 구조요소에 작용하는 압축력과 인장력, 모멘트는 중립축을 기준으로 식 (2)~(11)로 구해진다. 여기서 중립축은 압축력과 인장력의 평형관계로부터 얻을 수 있다.

$$F_{slab,c} = f'_c \left\{ ba - \frac{r_o^2}{2}(\alpha - \sin\alpha) \right\} \quad (2)$$

$$F_{sc} = f_y \left\{ \frac{\alpha}{2}(r_o^2 - r_i^2) \right\} \quad (3)$$

$$F_{cc} = 0.95f'_c \left\{ \frac{r_i^2}{2}(\alpha - \sin\alpha) \right\} \quad (4)$$

$$F_{st} = f_y \left\{ \left(\pi - \frac{\alpha}{2}\right)(r_o^2 - r_i^2) \right\} \quad (5)$$

$$F_{rt} = f_{ry}A_s \quad (6)$$

$$M_{slab,c} = f'_c ba \left(c - \frac{a}{2}\right) - f'_c \frac{r_o^2}{2}(\alpha - \sin\alpha)r_o \left(\frac{4\sin^3(\alpha/2)}{3\alpha - 3\sin\alpha} - \cos\frac{\alpha}{2}\right) \quad (7)$$

$$M_{sc} = f_y \left\{ \frac{\alpha}{2}(r_o^2 - r_i^2) \right\} \times \left\{ \frac{4}{3\alpha} \sin\frac{\alpha}{2} \left(\frac{r_o^3 - r_i^3}{r_o^2 - r_i^2}\right) - r_m \cos\frac{\alpha}{2} \right\} \quad (8)$$

$$M_{cc} = 0.95f'_c \left\{ \frac{r_i^2}{2}(\alpha - \sin\alpha) \right\} \times r_i \left(\frac{4\sin^3(\alpha/2)}{3\alpha - 3\sin\alpha} - \cos\frac{\alpha}{2}\right) \quad (9)$$

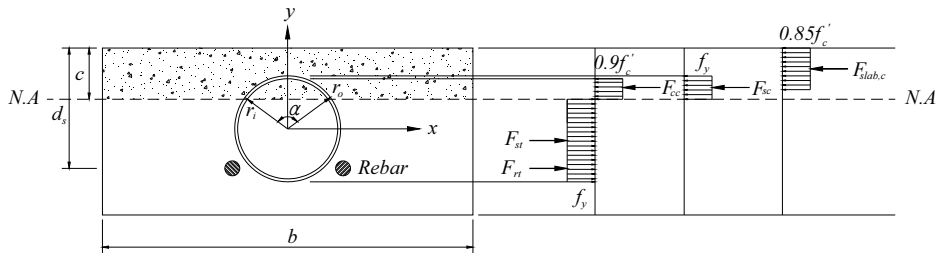


Fig. 1. Stress distribution of the CFT encased beam section

$$M_{st} = f_y \left\{ \left( \frac{\alpha}{2} - \pi \right) (r_o^2 - r_i^2) \right\} \times \left\{ \frac{2 \sin(\alpha/2)}{3(\pi - \alpha/2)} \left( \frac{r_o^3 - r_i^3}{r_o^2 - r_i^2} \right) + r_m \cos \frac{\alpha}{2} \right\} \quad (10)$$

$$M_{rt} = f_{ry} A_s d_r \quad (11)$$

여기서,  $F_{slab,c}$ 은 강관 외부의 콘크리트 슬래브의 압축력,  $F_{sc}$ 는 강관의 압축영역에서의 압축력,  $F_{ca}$ 는 강관 내부의 압축영역의 콘크리트에 의한 압축력,  $F_{st}$ 는 강관의 인장영역에서의 인장력,  $F_{rt}$ 는 강관 외부에 배치된 인장철근에 의한 인장력이다.  $f'_c$ 는 슬래브의 콘크리트 압축강도이고,  $f'_{c2}$ 는 강관 내부의 콘크리트 압축강도,  $f_y$ 는 강관의 항복강도,  $f_{ry}$ 는 인장철근의 항복강도이다. 또한,  $r_m$ 은 강관의 평균 반지름,  $r_o$ 은 강관의 외측 반지름,  $r_i$ 는 강관의 내측반지름,  $d_r$ 은 중립축에서 인장철근 도심까지의 거리이다.

### 3. 시험

시험체는 강관이 매립된 보의 휨거동을 평가하기 위한 것으로 강관내부를 콘크리트로 충전한 보와 강관의 휨강성을 높이기 위해 강관 주변에 철근으로 보강한 보를 설계하였다. 시험체는 강관의 운반 및 시공성을 높이기 위하여 강관 내부

**Table 1.** Concrete compressive strength test results

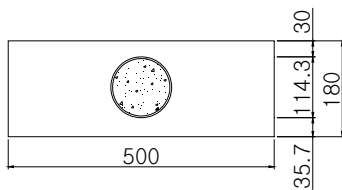
Type	Max. Load (kN)	$f'_c$ (MPa)	Average (MPa)
Plain concrete	134.0	17.1	17.0
	131.0	16.7	
Aerated concrete	23.7	3.0	2.6
	17.8	2.3	
	20.2	2.6	
Slab concrete	215.8	27.5	24.0
	180.8	23.0	
	172.2	21.9	
	172.1	21.9	
	201.6	25.7	

를 기포콘크리트를 충전하여 자중을 줄인 보와 일반콘크리트로 충전한 보, 그리고 일반콘크리트로 충전한 강관과 동등한 성능을 나타낼 수 있도록 강관 주변에 철근으로 보강한 보로서 모두 6개의 시험체를 제작하였다.

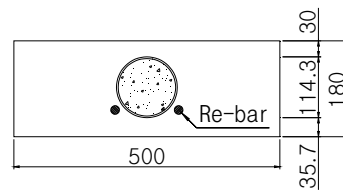
시험체의 크기는 500mm×180mm×2,000mm이다. 강관은 직경 101.6mm, 두께 3.2mm와 직경 114.3mm, 두께 3.2mm로서 SS490강재이며, 보강철근은 SD400이다. 시험체는 강관의 내부를 일반콘크리트(Plain Concrete)와 기포콘크리트(Aerated Concrete)로 충전한 강관과 강관 외부를 H16과 H13 철근으로 보강한 시험체로 구분하였다. 콘크리트 강도는 강관 외부콘크리트와 충전 콘크리트에 대한 공시

**Table 2.** Test specimens

Specimens	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Filled concrete type	Re-bar (SD400)	$f'_c$ of the filled concrete (MPa)	$f'_c$ of concrete slab (MPa)
CFT101-P	101.6	3.2	Plain	-	17	24
CFT101-A	101.6	3.2	Aerated	-	2.6	24
CFT101-A-16	101.6	3.2	Aerated	H16	2.6	24
CFT114-A	114.3	3.2	Aerated	-	2.6	24
CFT114-A-13	114.3	3.2	Aerated	H13	2.6	24
CFT114-P-13	114.3	3.2	Plain	H13	17	24



(a) Section view of specimen without re-bar



(b) Section view of specimen with re-bar

**Fig. 2.** Dimensions of specimen (unit: mm)

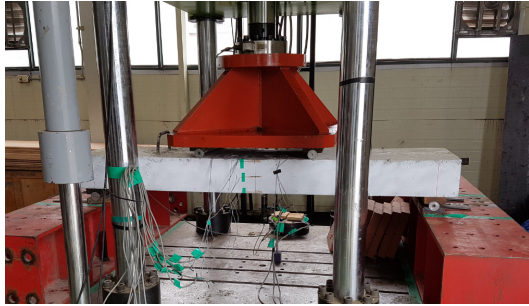


Fig. 3. Installation of the test specimen

체를 각각 제작하여 확인하였으며 그 결과는 Table 1에 나타내었다.

시험체는 종류는 Table 2에 제시하였으며, 시험체의 제원은 Fig. 2에 나타내었다.

정적 휨시험은 지점과 하중점간의 거리를 600mm로 하여 4점 재하로 시험하였으며 보 중앙에서의 변위와 강관의 상하면의 변형률을 측정하였다. 시험은 1,000 kN 용량의 유압 시험기(M&T)를 사용하였으며 Fig. 3에 시험광경을 나타내었다.

## 4. 시험결과 분석

### 4.1 파괴양상 및 최대하중

시험결과 시험체는 하중 재하 후 중앙 하단부에 균열이 발생하기 시작하였고 하중 증가에 따라 점차 휨균열이 발달하면서 Fig. 4와 같이 전형적인 휨파괴 형태를 나타내었다. 시험체의 파괴시까지 강관 또는 보 시험체의 갑작스런 변형은 나타나지 않았으며 기포콘크리트로 충전한 강관 보 시험체와 일반콘크리트로 충전한 강관 보 시험체간의 파괴 양상에 있어 차이점은 나타나지 않았다.

직경 101.6mm의 강관 보 시험체에서 균열하중은 Table 3



Fig. 4. Crack patterns at failure

Table 3. Test results

Specimens	Cracking load (kN)	Maximum load (kN)
CFT101-P	31.2	132.4
CFT101-A	16.2	71.9
CFT101-A-16	36.7	187.8
CFT114-A	20.7	91.8
CFT114-A-13	34.0	177.7
CFT114-P-13	35.8	200.9

과 같이 기포콘크리트로 충전한 시험체 CFT101-A가 가장 낮은 값을 나타내었고 일반콘크리트로 충전한 시험체 CFT101-P는 기포콘크리트로 충전한 시험체의 약 190% 높은 값을 나타내었다. 이는 강관의 변형에 대한 충전콘크리트의 내부 구속력의 차이에 의한 것으로 판단된다. 일반콘크리트와 동등한 강성을 가지도록 하기 위해 기포콘크리트를 충전하고 철근으로 보강한 시험체 CFT101-A-16는 CFT101-P에 비해 균열 하중은 117% 높은 값으로 나타났다. 이러한 결과는 최대하중에서도 유사하게 나타났다. 최대하중에서 CFT101-P는 CFT101-A에 비해 184%, CFT101-A-16는 CFT101-P에 비해 142% 높게 나타나 철근의 추가 배치로 보의 휨강도가 향상됨을 알 수 있었다.

직경 114.3mm의 강관 보 시험체에서 균열하중은 Table 2와 같이 기포콘크리트로 충전한 강관에 철근 H13으로 보강한 시험체 CFT114-A-13이 철근을 보강하지 않은 시험체 CFT114-A보다 약 164%의 큰 값을 나타내었고 최대하중은 약 193%의 증가를 나타내었다. 그러나 일반콘크리트로 충전한 강관 보 시험체 CFT114-P-13은 CFT114-A-13에 비하여 균열하중은 105%, 최대하중은 113% 증가하는 것으로 나타나 기포콘크리트 충전과 일반콘크리트 충전 강관 보사이의 휨강도 증가 효과는 상대적으로 크지 않았다.

### 4.2 하중-변위 곡선

Fig. 5는 직경 101.3mm 강관 보 시험체의 하중-변위 곡선을 나타낸 것으로 CFT101-P-16 시험체가 초기 강성과 최대하중이 크게 나타났으며 최대 하중이후에도 비교적 큰 하중과 연성이 유지되고 있다. CFT101-P와 CFT101-A 시험체도 최대 하중이후에 큰 연성을 보이지만 하중이 갑자기 떨어지는 구간이 있어 하중 증가에 따라 강관의 갑작스러운 변형이 있었던 것으로 판단된다.

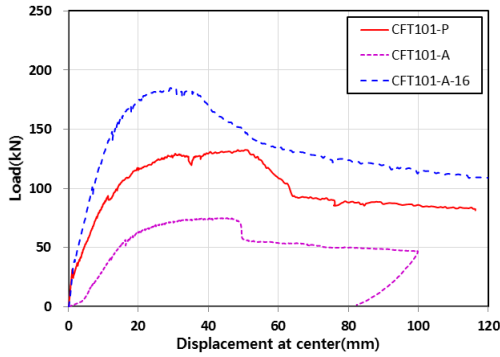


Fig. 5. Load-displacement relations for CFT101 series specimens

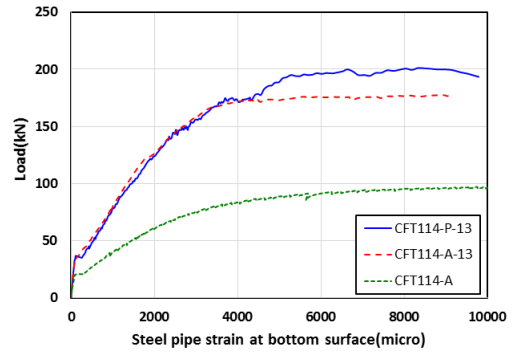


Fig. 7. Tensile strain at the bottom of steel tube

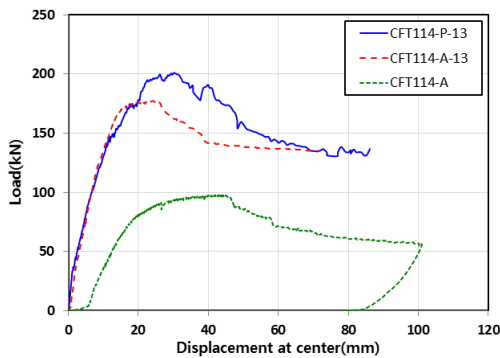


Fig. 6. Load-displacement relations for CFT114 series specimens

Fig. 6은 직경 114.3mm 강관 보 시험체의 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 기포콘크리트로 충전한 CFT114-AC 시험체는 가장 낮은 강도를 나타내었으며 최대 하중 이후에 하중이 갑작스럽게 떨어지는 현상이 나타났다. 철근으로 보강한 CFT114-P-13과 CFT114-A-13 시험체는 일반콘크리트로 충전한 시험체가 더 높은 강도를 나타내었으나 하중이 증가하는 동안 거의 동일한 강성을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서, 하중이 증가하는 동안 철근의 보강으로 인하여 최대하중 까지 동일한 강성을 나타내며 그로인해 강관 내부의 충전콘크리트의 영향은 상대적으로 적음을 알 수 있다.

### 4.3 강관의 변형률

Fig. 7은 직경 114.3mm 강관 보 시험체에서 하중재하에 따른 강관 하면에서의 인장변형률을 나타낸 것이다. 강관을 철근으로 보강한 시험체와 보강하지 않은 시험체 간의 휨 강도는 상당한 차이를 나타내며, 일반콘크리트로 충전한 시험체가 가장 큰 강도를 나타낸다. 또한, 철근으로 보강한 시험체는 인장변형률이 약 0.4%까지는 거의 동일한 거동을 나타내며 그 이후 최대 하중에서는 차이를 나타내었다. 따라서,

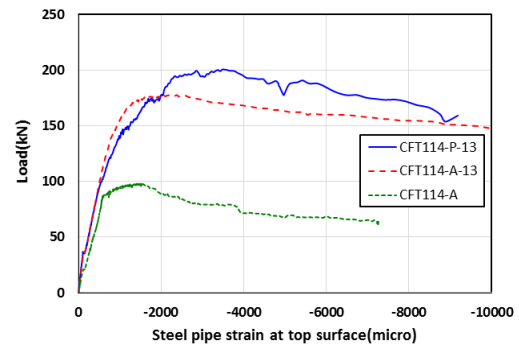


Fig. 8. Compressive strain at the top of steel tube

CFT114-P-13 시험체와 CFT114-A-13 시험체는 인장 항복시까지는 충전콘크리트의 종류와 관계없이 동일한 휨강도를 가진다고 할 수 있다.

Fig. 8은 직경 114.3mm 강관 보 시험체에서 하중재하에 따른 강관 상면에서의 압축변형률을 나타낸 것이다. 철근으로 보강하지 않은 시험체 CFT114-A는 약 0.06%에서 변형이 시작된 것으로 판단되고 항복변형률에 도달하면서 하중이 감소하기 시작하는 것으로 나타났다. 한편, 철근으로 보강한 CFT114-A-13과 CFT114-P-13 시험체는 압축 항복 변형률까지 도달한 후 갑작스런 강도의 저하 없이 높은 강도가 유지되는 것으로 나타났다.

따라서, 하중과 강관의 인장변형률과 압축변형률의 관계로 볼 때 강관을 일반콘크리트로 충전한 경우가 기포콘크리트로 충전한 경우보다 더 큰 강도를 나타내지만 항복시까지는 동일한 휨 거동을 나타내며 최대하중 이후에도 높은 강도가 유지됨을 알 수 있다.

### 4.4 철근에 의한 보강효과

Fig. 9는 철근으로 보강된 시험체의 하중-변위 곡선을 비

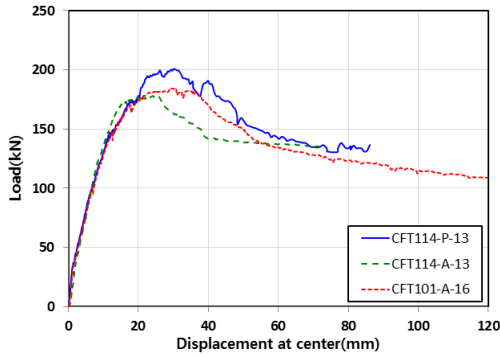


Fig. 9. Load-displacement relations for specimens with re-bar

교한 것이다. 3개의 시험체 모두 변위 약 20mm까지 거의 동일한 강성을 나타내었다. 또한, 최대하중은 CFT114-A-13이 가장 크며 CFT114-A-13과 CFT101-A-16은 거의 동일한 강도를 나타내었다. 이는 강관 주변을 철근으로 보강하고 일반콘크리트 충전한 경우 가장 높은 휨강도를 나타내지만 시공성 개선을 위하여 기포콘크리트로 충전한 강관 보의 경우에도 철근으로 적절히 보강함으로써 휨강도 측면에서 최적 단면을 선정할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4.5 휨강도의 예측

CFT 매립 보의 휨강도를 추정하기 위하여 소성응력분배법을 이용하여 강도를 예측한 결과와 실험결과를 Table 4에 나타내었다.

보 시험체의 휨강도는 강관 내부를 기포콘크리트로 충전한 CFT101-A와 CFT114-A는 이론적으로 구한 강도와 거의 일치하는 것으로 나타났으나 다른 시험체는 약 150%~190%의 큰 차이를 나타내었다. 이러한 이유는 부재의 유효폭이 명확하지 않고, 부재 단면이 소성상태에 도달하였을 때 중립축은 강관상부에 위치하게 되므로 해석의 가정상 강관 내부의 콘크리트는 인장영역에 있게 되므로 강관 내부 콘크리트의 구속에 의한 강관의 강도 증가효과가 고려되지 않기 때문

Table 4. Comparison with the flexural strength of beam

Specimens	$M_{exp}$ (kN·m)	$M_{cal}$ (kN·m)	$M_{exp}/M_{cal}$
CFT101-P	39.72	20.83	1.90
CFT101-A	21.57	20.83	1.03
CFT101-A-16	56.34	34.04	1.66
CFT114-A	27.54	25.40	1.08
CFT114-A-13	53.31	35.19	1.51
CFT114-P-13	60.27	35.22	1.71

이며, 그 결과 강관이 항복강도이상의 응력을 나타내는 부분에 대한 고려가 반영되지 않기 때문에 판단된다. 즉, 강관 내부의 콘크리트 강도가 낮은 기포콘크리트의 경우 휨강도는 이론상의 가정과 유사하여 이론식을 적용할 수 있지만 강관 내부의 콘크리트와 강관, 그리고 강관 외부의 콘크리트와의 상호 구속효과에 의한 각 부재요소간의 강도 증가효과는 충분히 설명되지 못하는 것으로 판단된다. 따라서, CFT 강관 매립보의 경우 강도 예측은 보의 유효폭, 강관과 강관 내부의 충전콘크리트, 외부의 슬래브 콘크리트간의 구속력과 상호작용력, 강관의 소성상태에서의 응력 등이 고려되어야 하며 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

## 5. 결론

본 연구에서는 강관 내부를 일반콘크리트와 기포콘크리트로 충전한 강관을 매립한 보의 휨거동을 실험적으로 분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 강관을 일반콘크리트와 기포콘크리트로 충전한 강관 보 시험체의 경우 일반콘크리트를 충전한 강관 보 시험체가 균열하중 및 최대하중이 더 큰 것을 확인하였다.
- (2) 강관 외부에 철근으로 보강한 시험체의 경우 강관의 항복시까지의 충전 콘크리트의 종류에 관계없이 동일한 휨거동을 나타내었으며, 최대하중은 일반콘크리트로 충전한 경우 좀 더 큰 값을 나타내었다. 따라서, 철근에 의해 보강된 보의 휨거동에 있어서는 충전콘크리트의 영향은 크지 않다.
- (3) CFT 부재의 운반과 시공성을 개선하기 위해서 강관 내부를 기포콘크리트로 충전한 경우 철근에 의한 추가 보강으로 일반콘크리트와 동등한 성능의 보를 얻을 수 있다.
- (4) CFT 매립보의 강도 예측은 강관을 기포콘크리트로 충전한 경우 소성응력분배법에 의해 강도를 추정할 수 있지만 그렇지 않은 경우 부재의 유효폭, 강관과 강관 내부의 충전콘크리트, 외부의 슬래브 콘크리트간의 구속력과 상호작용력, 강관의 소성상태에서의 응력 등이 고려되어야 하며 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다. 또한 강재의 활용성을 높이기 위하여 콘크리트 충전 강관을 터널지보재로 활용함에 대한 시공성과 경제성을 높이는 방안의 연구가 필요하다.

## 감사의 글

이 논문은 2016학년도 부천대학교 교비지원 연구비에 의하여 지원된 연구의 결과이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌(References)

- [1] Sherman, D.R. (1976) Test of Circular Steel Tubes in Bending, *ASCE Journal of the Structural Division*, Vol.102, No.11, pp.2181-2195.
- [2] Rangan, B.V. and Joyce, M. (1992) Strength of Eccentrically Loaded Slender Steel Tubular Columns Filled with High-strength Concrete, *ACI Struct. J.* Vol.89, No.6, pp. 676-681.
- [3] Goode, C.D. and Lam, D. (2008) *Concrete-filled tube columns-Tests compared with Eurocode 4*, Proceedings of Engineering Foundation Conference on Composite Construction.
- [4] Roeder, C.W., Lehman, D.E., and Bishop, E. (2010) Strength and Stiffness of Circular Concrete Filled Tubes, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.136, No.12, pp.1545-1553.
- [5] 정철현, 진병무, 김인규, 김성운(2004) 중공 강관 및 콘크리트 충전강관의 휨 실험, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제24권, 제4A호, pp.807-816.
- Chung, C.H., Jin, B.M., Kim, I.G., and Kim, S.W. (2004) Experiments on Circular Steel Tubes and Concrete Filled Circular Steel Tubes in Bending, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.24, No.4A, pp.807-816 (in Korean).
- [6] 정철현, 김종석(2007) 콘크리트 충전 원형 강관의 휨 거동, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제27권, 제4A호, pp.553-559.
- Chung, C.H. and Kim, J.S. (2007) Flexural behaviour of Circular Concrete-Filled Steel Tube Sections, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.27, No.4A, pp. 553-559(in Korean)
- [7] 이호준, 박홍근, 최인탁(2015) 콘크리트피복 원형충전강관 기둥의 압축성능, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제27권, 제6호, pp.525-536.
- Lee, H.J., Park, H.G., and Choi, I.R. (2015) Axial Load Performance of Circular CFT Columns with Concrete Encasement, *Journal of the Korean Society of Steel Structures*, KSSC, Vol.27, No.6, pp.525-536 (in Korean).
- [8] 마향욱, 오현철, 김동욱, Kong D., 심창수(2012) 충전원형 강관을 이용한 모듈러 교각의 휨 거동 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제6호, pp.725-734.
- Ma, H.W., Oh, H.C., Kim, D.W., Kong, D., and Shim, C. S. (2014) Evaluation of Flexural Behavior of a Modular Pier with Circular CFT, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.6, pp.725-734 (in Korean).
- [9] 최영환, 김강수, 최성모, 이상섭 (2007) 고강도 콘크리트를 사용한 각형 CFT 기둥, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제19권, 제6호, pp.575-585.
- Choi, Y.H., Kim, K.S., Choi, S.M., and Lee, S.S. (2007) P-M Interaction Curve for Square CFTs with High-Strength Concrete, *Journal of the Korean Society of Steel Structures*, Vol.19, No.6, pp.575-585 (in Korean).
- [10] ACI (2011) *Building code requirements for structural concrete and commentary*, Farmington Hills, Mich.
- [11] AISC (2010) *Specifications for structural steel buildings*, Chicago, IL.
- [12] Eurocode 4, *European Committee for Standard, EN 1994-1-1(2004)*. Design of composite steel and concrete structures, European Union.

**요 약 :** 본 연구는 콘크리트 충전 강관을 터널의 강지보재로 활용하기 위한 것으로서, 콘크리트 충전강관 부재가 콘크리트 내에 매립되어 합성부재로 거동하는 경우에 대한 부재의 강도와 거동특성을 실험적으로 평가하였다. 이를 위하여 두 종류의 강관과 강관 내부를 일반콘크리트와 기포콘크리트로 충전한 경우, 콘크리트 슬래브에 철근으로 보강한 경우를 대상으로 총 6개의 보 시험체를 제작하였으며 정적 휨시험을 수행하였다. 그 결과, 일반콘크리트로 충전한 강관이 기포콘크리트로 충전한 것보다 더 높은 강도를 나타내었다. 그러나 강관 주변을 철근으로 보강한 경우 휨강도는 충전콘크리트의 종류보다 철근량의 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

**핵심용어 :** 콘크리트 충전 강관, 매립보, 휨거동, 휨강도