

CFT 모듈을 이용한 단면개선 연속 강박스 거더의 하중저항 효과 분석

이학준¹ · 하태열² · 조광일³ · 안진희^{4*}

¹박사과정, 경상국립대학교, 건설시스템공학과, ²부장, (주)텍한, 연구개발팀, ³팀장, (주)텍한, 연구개발팀,
⁴교수, 경상국립대학교, 건설시스템공학과

Load Resistance Effect Analysis of the Continuous Steel Box Girder with the Cross-sectional Improvement by CFT Modules

Lee, Hak Joon¹, Ha, Tae-Yul², Cho, Kwang-Il³, Ahn, Jin-Hee^{4*}

¹Ph.D. Student, Dept. of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University, JinJu, 52725, Korea

²Manager, Tekhan Inc., Dept. of R&D Team, Uiwang, 16006, Korea

³Director, Tekhan Inc., Dept. of R&D Team, Uiwang, 16006, Korea

⁴Professor, Dept. of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University, JinJu, 52725, Korea

Abstract - The continuous open-top steel box girders with improved cross-sections by CFT modules reduce cross-sectional stresses by installing concrete-filled steel tubes(CFT) in the hogging moment region. In this study, an experimental and numerical analysis was conducted to investigate the effects of a method for reducing a cross-sectional stress for continuous steel box girders using CFT members. To analyze the cross-sectional improvement for continuous steel box girder by CFT modules, a steel box specimen with a CFT module was fabricated, and induced prestress in steel box specimen by CFT modules. And confirmed the cross-sectional stress behavior of the steel box specimen through the three-point flexural test. The prestressing test using CFT modules and the three-point flexural test were verified through finite element analysis(FEA), and compared the cross-sectional stresses under the same condition depending on the cross-section of the CFT module. The results of the finite element analysis depending on the cross-section of the CFT module showed that as the cross-section of the CFT module increased under the same load conditions, the stress of the lower flange of the steel box girder decreased due to the increase in cross-sectional stiffness. In addition, Inducing prestress for the steel box girder confirmed to improve the cross-section of steel box girder in the hogging moment region.

Keywords - Continuous open-top steel box girder, Hogging moment region, CFT module, Prestressing test, Flexural test

1. 서론

강합성 교량은 강재와 콘크리트의 재료적 특성을 활용하여 합리적인 설계가 가능한 형식이다. 대표적인 강합성 교량 중 하나인 개구제형 강박스 거더(Open-top steel box girder)는 기존의 폐합형 강박스 거더와 비교하여 상부플랜지를 최소화하고 그 위치에 압축력에 저

항할 수 있는 콘크리트 슬래브를 설치하여 강재량을 절감하고 제작 공정을 간편화할 수 있는 강박스 거더 형식이다. 경제성과 강박스 제작 측면에서 장점을 가지고 있는 개구제형 강합성 박스 거더교는 중·소형교량에서는 다양한 형태로 적용되고 있으나, 연속교에 적용할 경우 연속지점부 구간에서 발생하는 부모멘트로 인하여 콘크리트 슬래브에 인장균열과 하부 강박스 거더의 좌굴문제에 대한 보강이 필요하다.

연속교로 적용된 개구제형 강합성 박스 거더교량의 구조적 문제를 개선하기 위하여 연속지점부의 단면 높이를 증가시켜 연속지점부의 휨 강성을 개선하거나, 강박스 하부에 콘크리트를 충전 또는 연속지점부에 프리스트레싱을 도입하는 방법 등이 적용되고 있다^{[1]-[16]}. 연속지점부 강박스 내부 하부플랜지에 콘크리트를 타설하여 단

Note.-Discussion open until June 30, 2025. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 24, 2024; revised November 27, 2024; approved on November 28, 2024. Copyright © 2024 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-55-772-3293 Fax. +82-55-772-3209

E-mail. jahn@gnu.ac.kr

면강성 증가와 하부플랜지의 좌굴저항성을 향상시킨 강합성 거더의 경우 동일한 조건에서 거더 단면의 높이를 줄일 수 있는 장점이 있으며, 이와 같은 다양한 연구가 진행되었다^{[1]-[9]}. 또한 연속교에서 발생하는 부모멘트에 대한 콘크리트 슬래브의 균열 저항성과 균열 모멘트 성능 향상을 위하여 연속지점부에 프리스트레싱 도입한 강합성 거더에 대한 연구들도 확인할 수 있다^{[9]-[16]}.

본 연구에서는 연속지점부 하부플랜지 단면 개선과 연속지점부 프리스트레싱 도입효과를 동시에 고려할 수 있는 방법으로 구조적인 성능이 확인되어 다양한 분야에 활용된 콘크리트 충전 강관(CFT, Concrete Filled steel Tube)^{[17]-[21]}을 모듈로 이용하여 연속지점부 단면을 개선한 개구제형 강박스 거더의 부모멘트에 대한 하중 저항성과 프리스트레싱 도입효과를 실험적으로 확인하고자 하였다. 모듈형 CFT를 이용하여 연속지점부 단면을 개선한 개구제형 강박스 거더는 Fig. 1과 같이 프리스트레싱된 사각형 CFT를 강박스 내부 하부플랜지와 일체화한 후 도입된 프리스트레싱을 제거함으로써 CFT 모듈과 일체화된 강박스 거더의 단면강성 향상과 도입된 프리스트레싱력의 제거로 발생하는 프리스트레싱 효과를 이용할 수 있다^[22]. CFT 모듈과 일체화된 강박스 거더의 단면 개선효과와 프리스트레싱 도입효과를 실험적으로 확인하기 위하여 개구제형 강박스 시험체를 제작하고 강박스 시험체에 CFT 모듈을 이용한 프리스트레싱도입 실험과 하중재하시험을 실시하고 유한요소해석(FEA; Finite Element Analysis)과 비교하였다.

2. CFT 모듈을 이용한 강박스 시험체의 프리스트레싱 도입 및 하중재하 시험

CFT 모듈을 이용한 연속지점부 강박스 거더에 대한 프리스트레싱 도입과 단면강성 개선방법은 긴장재를 통하여 프리스트레싱이 도입된 사각형 CFT 모듈을 강박스 거더 하부플랜지와 일체화한 후 도입된 프리스트레싱력을 제거함으로써 발생하는 CFT 모듈의 복원력을 강박스 거더에 대한 프리스트레싱 효과로 활용하고, CFT 모듈이 강박스 거더와 일체화 되면서 강박스 거더의 강성을 향상시킬 수 있다.

프리스트레싱 제거를 통하여 발생하는 CFT 모듈의 복원력은 강박스 거더 하부플랜지에 인장응력을 도입 시킴으로써 부모멘트의 영향으로 압축응력을 받는 연속지점부 강박스 거더의 하부플랜지에 압축응력을 감소시킬 수 있으며, CFT 모듈은 강박스 거더의 프리스트레싱 효과를 도입하기 위한 프리스트레싱 부재이며, 강박스 거더 하부플랜지와 일체화 됨에 따라 강성을 향상시키는 강박스 거더의 단면으로 고려된다. 본 연구에서는 개구제형 강박스 거더 시험체를 대상으로 프리스트레싱 강봉을 통하여 프리스트레싱이 도입된 CFT 모듈을 용접하여 일체화한 후 도입된 프리스트레싱력을 제거함으로써 강박스 거더에 도입되는 프리스트레싱 효과를 확인하고 강박스 시험체의 하중재하 실험을 통하여 CFT 모듈에 의한 강성증가 효과를 실험적으로 확인하였다.

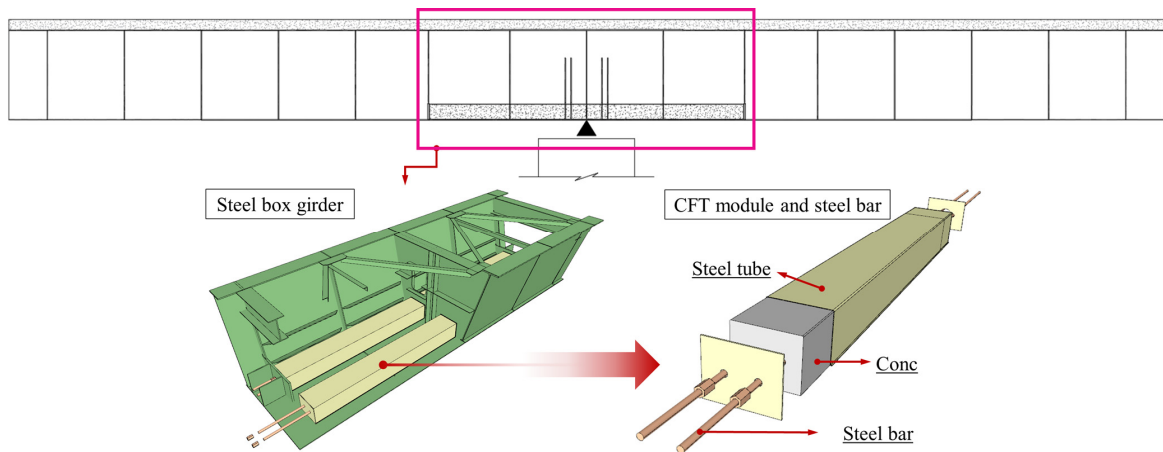


Fig. 1. Concept of the cross-sectional improvement method of continuous steel box girder bridges using CFT modules

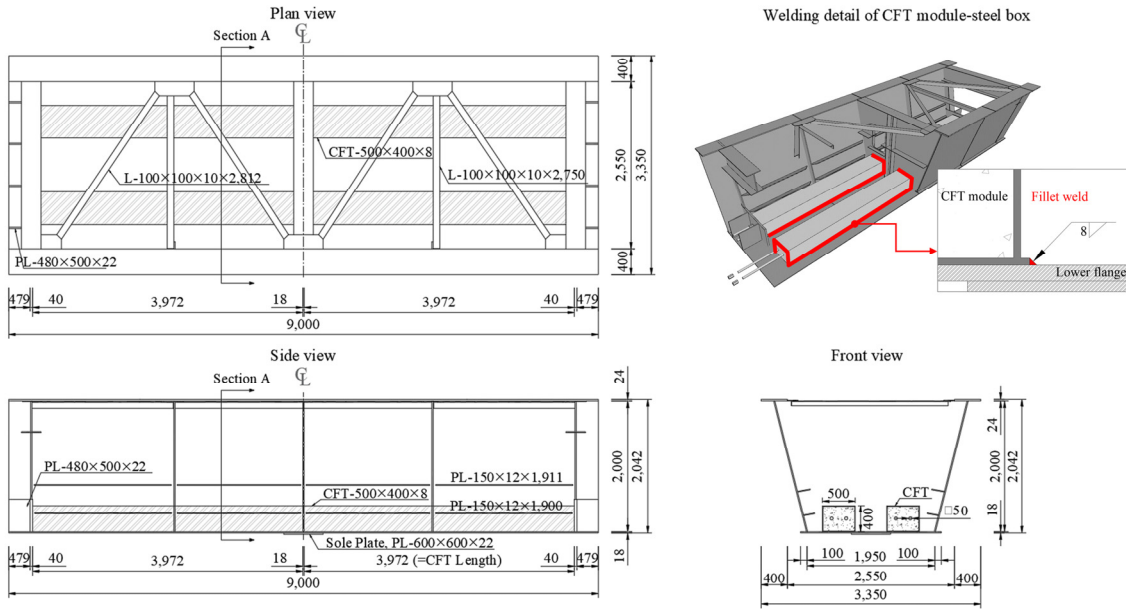


Fig. 2. Dimension of a steel box specimen with CFT module and welding detail of CFT module-steel box (mm)

2.1 개구제형 강박스 시험체 제원

본 연구에서 사용된 개구제형 강박스 시험체는 길이 9.0 m, 상하부 플랜지를 포함한 높이 2.042 m이며, 폭 2.15 m(하부)–3.35 m(상부)로 KDS 14 31 10(2017)^[23]에 따라 설계되었으며, 강박스 거더에 대한 프리스트레싱 도입과 단면강성 개선을 위하여 길이 3,972 mm, 폭 500 mm, 높이 400 mm의 CFT 모듈을 하부플랜지에 길이 방향으로 2개씩 연결 배치하여 설치한 후 프리스트레싱 강봉을 통하여 프리스트레싱을 도입하고, 계획된 프리스트레싱 도입력을 확인한 후 CFT 모듈과 강박스 거더를 용접으로 일체화한 후 CFT 모듈에 도입된 프리스트레싱력을 제거하도록 계획되었다. 이를 위하여 개구제형 강박스 거더 시험체는 항복강도가 380 MPa이고 인장강도 500 MPa인 HSB380 강종을 이용하여 제작하였으며, 프리스트레싱 도입을 위한 CFT 모듈 또한 HSB380을 이용하여 박스 단면을 제작하고 상부를 통하여 설계압축강도는 45 MPa의 콘크리트를 충전하였다. 또한 하중재하 실험과 개구제형 강박스의 비틀림 거동을 고려하여 L형강을 브레이싱 부재로 설치하였으며, CFT 모듈의 프리스트레싱 도입을 위하여 강박스 거더 단부에 프리스트레싱 도입을 위하여 필요한 지지대를 보강재로 설치하였다. Fig. 2는 개구제형 강박스 시험체의 제원을 나타내었다.

2.2 프리스트레싱 도입 및 하중재하 실험 방법

개구제형 강박스 거더 시험체에 프리스트레싱 도입을 위해서는 CFT 모듈에 대한 프리스트레싱 도입이 필요하다. CFT 모듈의 프리스트레싱 도입은 강박스 거더 하부플랜지에 연속 배치된 CFT 모듈내 배치된 강봉의 한측 단부를 고정한 뒤 나머지 한측 단부에서 최대 실린더 용량이 1,985 kN인 유압잭을 이용하여 1,616 kN의 압축력을 도입하였다. 도입된 압축력의 수준을 확인하기 위하여 로드셀(Load cell)을 이용하였으며, 압축력이 도입된 상태에서 CFT 모듈과 강박스 거더 하부플랜지를 용접으로 일체화하였다. 강박스 거더와 일체화된 CFT 모듈에 설치된 강봉에 도입된 프리스트레싱력을 제거함으로써 CFT 모듈에 도입된 프리스트레싱으로 발생된 변형에 대한 복원력을 강박스 거더의 프리스트레싱력으로 이용하였으며, 프리스트레싱력의 제거시 발생하는 프리스트레싱 효과는 변형률 게이지를 통하여 확인하였다. 프리스트레싱력의 손실의 경우 CFT 모듈에서 발생할 수 있는 크리프에 의한 프리스트레싱 손실에 대한 연구가 진행되었으나^[24] CFT 모듈에 도입된 프리스트레싱력의 제거시 발생할 수 있는 즉시 손실은 강박스 거더와 CFT 모듈을 용접으로 일체화한 후 도입된 프리스트레싱력을 제거하므로 상대적으로 프리스트레싱 효과의 손실은 크지 않을 것으로 판단하여 본

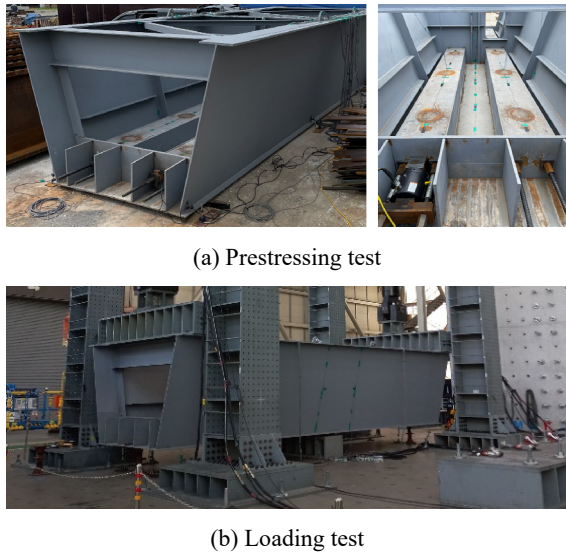


Fig. 3. PS test and the loading test set-up

연구에서는 이를 고려하지 않았다.

CFT 모듈과 일체화된 강박스 거더 시험체의 부모멘트에 대한 하중저항효과를 확인하기 위하여 연속지점부의 부모멘트 효과를 모사한 3점 휨 실험을 실시하였다. 3점 휨 실험은 강박스 거더와 콘크리트 슬래브를 합성전 고정하중 상태에서 발생하는 단면응력상태를 확인하고 CFT 모듈에 의한 강박스 거더의 단면 저항 수준을 확인하고자 하였다. 하중재하 실험전에 대상 단면에 대한 설계 하중으로 약 1,695 kN으로 계획하고 0.01 mm/s의 속도로 하중이 강박스 거더 중앙에서 4,000 mm 위치에 재하될 수 있도록 하였다.

Fig. 3(a)는 개구제형 강박스 시험체의 프리스트레싱 도입 실험모습이며 프리스트레싱 도입을 위하여 제작된 CFT 모듈을 강박스 시험체에 설치한 후 강봉에 긴장력을 도입한 상태이다. CFT 모듈과 강박스 시험체를

용접하여 일체화 한 후 강봉에 도입된 긴장력을 제거하여 강박스 거더에 도입되는 프리스트레싱 수준을 확인하였다. Fig. 3(b)는 CFT 모듈을 이용하여 프리스트레싱이 도입된 강박스 시험체를 대상으로 연속지점부 조건에 대한 단면 응력 수준을 확인하기 위하여 실시한 3점 휨 시험을 나타낸 것으로, 시험체의 양 끝에 액추에이터를 이용하여 시험체에 하중을 가하였다. 하중재하 시험으로 나타나는 단면응력분포를 확인하기 위하여 설치된 변형률계이지와 변위계(LVDT)는 Fig. 4에 나타내었다.

2.3 프리스트레싱 및 하중재하 실험효과 확인을 위한 유한요소해석

CFT 모듈을 이용한 개구제형 강박스 시험체에 대한 프리스트레싱 도입 결과와 하중재하 실험결과 나타나는 하중저항 효과를 확인하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(2022)를 이용하여 실험조건과 동일하게 강박스 시험체를 모형화하고 실험결과와 해석 결과를 비교할 수 있도록 하였다^[25]. 또한 CFT 모듈 제원에 따른 강박스 거더의 단면강성 및 프리스트레싱 효과가 변화할 수 있으므로 CFT 모듈이 없는 경우를 고려하여 연속지점부 강박스 거더에 적용가능한 종방향 보강재(16 × 180 mm, 2EA)가 설치된 경우와 CFT 모듈 단면 변화에 따른 하중저항 성능 또한 유한요소해석을 통하여 확인하였다. CFT 모듈 제원 변화의 경우 CFT 부재의 두께 8 mm를 유지한 채로 CFT 모듈의 폭과 높이가 변화될 것을 가정하였으며 CFT 모듈의 폭은 600 mm, 650 mm, 700 mm이며 높이는 500 mm, 550 mm, 600 mm으로 설정하였다.

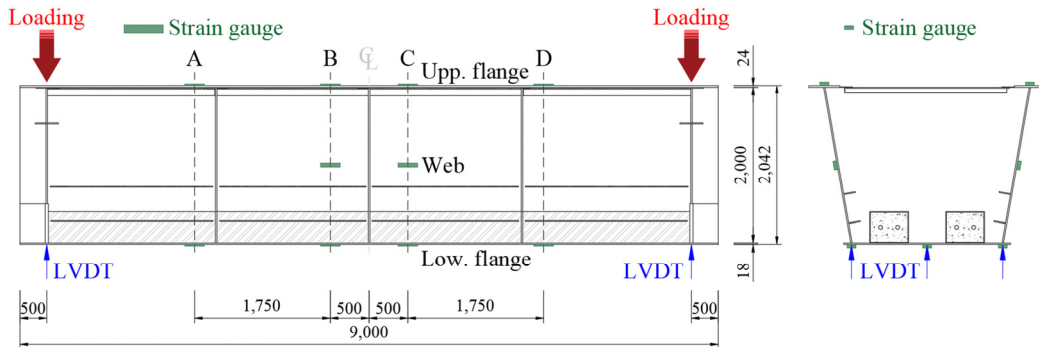


Fig. 4. Locations of strain gauges and LVDTs for loading test

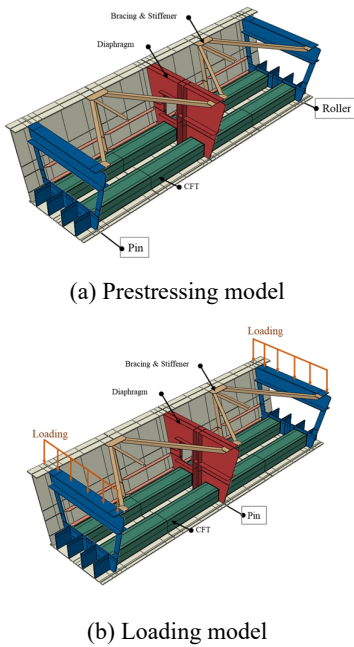


Fig. 5. FEA model conditions for the steel box specimen

강박스 시험체의 유한요소해석 모델의 해석조건을 Fig. 5에 나타내었으며, 유한요소해석 모델에서 강박스 거더와 CFT 모듈은 8절점 솔리드요소(C3D8R)로, 보강재는 10절점 사면체 솔리드요소(C3D10)로 모델화하였다. 재료특성으로 강재의 탄성계수는 205,000 MPa, 포아송비는 0.3을 사용하였으며, CFT 모듈에 사용된 콘크리트는 압축강도 45 MPa에 해당하는 탄성계수와 포아송비는 0.16을 사용하였다. 프리스트레싱 도입의 경우 탄성범위내에서 프리스트레싱 도입 효과를 확인하였으나, 하중재하 실험의 경우 부모멘트에 의하여 강박스 거더에서 나타나는 하중저항 성능을 비교하여 위하여 재료의 비선형 특성을 고려하였다. 콘크리트 재료의 경우 Hognestad model을 사용하였으며^[26], 강재는 탄성-완전소성(Elastic-perfectly plastic) 모델을 사용하였다. 강박스 거더 시험체의 경계조건으로 CFT 모듈과 강박스 거더의 연결 세부사항을 고려하여 강박스 거더와 CFT모듈은 용접선을 따라 Tie로 모델화하였으며, CFT 모듈과 하부플랜지 사이는 접촉조건(Contact : surface to surface)을 적용하여 CFT 모듈과 하부플랜지 간의 상호작용을 고려하였다. 프리스트레싱 해석에 적용된 프리스트레싱의 경우 압축된 CFT 모듈이 강박스 거더와 용접으로 일체화된 후 압축력을 제거함으로 인하여 강박스 거더에 프리스트레스가 도입되므로,

Predefined field(Type : Stress)를 이용하여 프리스트레싱 시험에서 로드셀을 통하여 계측된 CFT 모듈의 압축력을 응력으로 환산하여 CFT 모듈에 입력하였다. 유한요소해석모델의 지지조건은 각각의 시험조건과 동일하게 적용하였으며, 프리스트레싱 도입 모델에서는 단순지지조건으로 적용하였고 하중재하 시험의 경우 3점 굽힘 시험 조건과 동일하게 설정하였다.

3. 프리스트레싱 도입 및 하중재하 실험 결과

3.1 프리스트레싱 도입 실험 결과

CFT 모듈에 강봉을 이용하여 1,616 kN의 압축력을 도입하고 강박스 거더 하부플랜지와 용접으로 일체화한 후 강봉에 도입된 프리스트레싱력의 제거를 통하여 강박스 거더에 도입되는 프리스트레싱 효과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6와 같이 각 모듈에 도입된 프리스트레싱력의 제거를 통하여 강박스 거더 하부플랜지에 CFT 모듈의 복원력에 의하여 프리스트레스 효과가 도입되고 있음을 확인할 수 있다. 설계단계에서 강박스

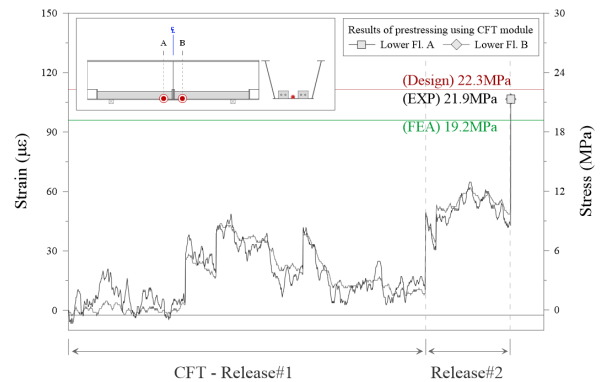


Fig. 6. Results of prestresses inducing for steel box specimen by CFT modules

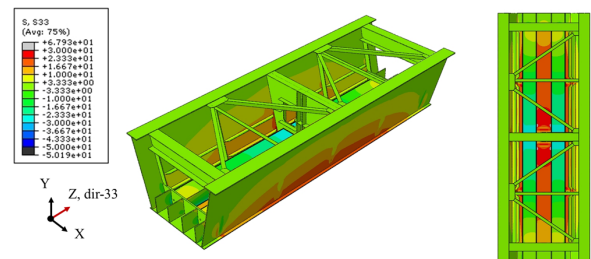


Fig. 7. Stress contour of FE analysis for PS test

Table 1. Prestressing test results by CFT modules

	Test	Design	FE results
Prestress	21.9 MPa	22.3 MPa	19.2 MPa
Comparison	1.00	1.02	0.88

거더 하부플랜지에 도입되는 프리스트레싱 효과는 강박스 거더의 단면강성과 도입 프리스트레싱 효과를 고려하여 22.3 MPa이 도입되는 것으로 계산되었으며, 실험결과 최종적으로 하부플랜지에 도입된 프리스트레싱은 21.9 MPa로 나타났다. 이와 비교하여 유한요소해석 결과는 19.2 MPa로 평가되었다. Fig. 7은 프리스트레싱 도입 실험에 대한 유한요소해석 결과를 나타낸 것이다.

CFT 모듈을 이용한 강박스 거더의 프리스트레싱 도입효과를 비교하여 Table 1에 나타내었으며, Table 1에서 설계 프리스트레싱은 강박스 거더 시험체의 단면강성과 도입 프리스트레싱력에 의하여 계산되었다. Table 1에 나타낸 것과 같이 CFT 모듈을 이용하여 도입된 프리스트레싱 효과는 설계시 고려된 프리스트레싱 효과 및 유한요소해석 결과와 유사하게 나타나고 있으며 이를 통하여 도입 프리스트레싱 수준을 설계단계에서 반영하여 단면설계에 고려할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 부모멘트부 하중재하 실험 결과

CFT 모듈과 일체화된 개구제형 강박스 거더에 대한 부모멘트 하중에 대한 하중저항효과 확인을 위한 3점 휨 시험 결과를 Fig. 8의 하중-변위관계와 Fig. 9의 하중-변형률 관계로 나타내었다. 대상 강박스 시험체의 설계하중 수준을 1,695 kN으로 계획하였으므로 계획된 하중 수준과 이를 초과하여 약 2,200 kN까지 하중을 재하하였다. Fig. 8에 나타난 것과 같이 부모멘트 하중재하과정에서 강박스 거더의 하중-변위는 선형적인 거동을 나타내고 있으며, 강박스 거더에 부착된 변형률 계측결과에서도 변위관계와 유사하게 선형적으로 나타나고 있음을 확인하였다.

하중재하 실험결과를 확인하기 위하여 Fig. 10에 대상 강박스 거더에 대한 설계하중(Design load) 상태와 최종하중(Final load) 상태에 대한 유한요소해석 결과를 비교하여 나타내었다. 또한, 하중재하상태에서 개구제형 강박스 거더에서 나타나는 단면응력을 비교하기

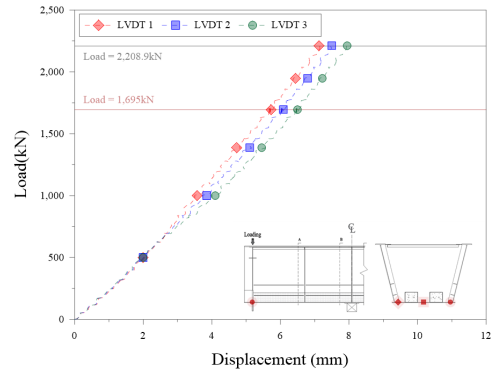
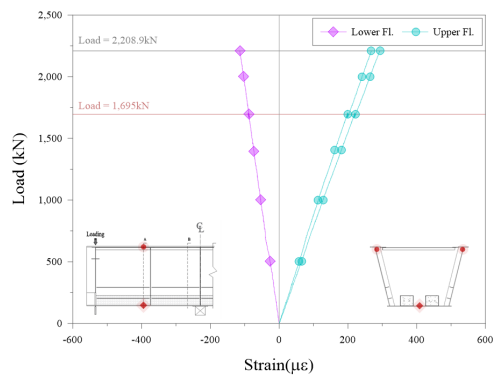
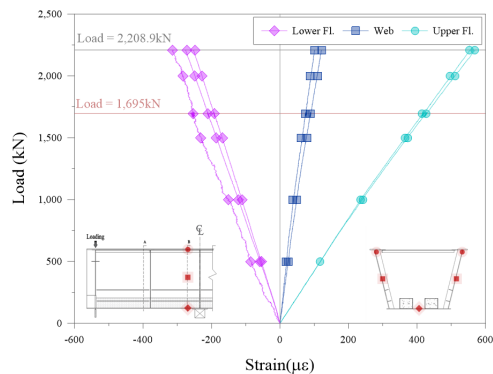


Fig. 8. The load-displacement relationship of the loading test



(a) Section A

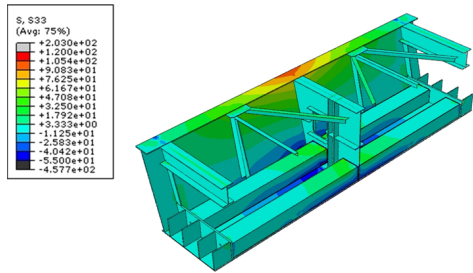


(b) Section B

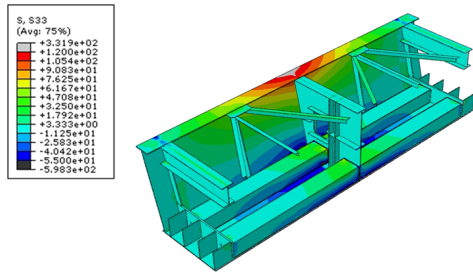
Fig. 9. The load-strain relationship of the loading test

위하여 Fig. 11에 설계하중 및 최종하중 상태에서의 응력 및 중립축 위치를 유한요소해석결과와 비교하여 나타내었다. Fig. 11과 Table 2에 나타낸 것과 같이 응력 및 중립축의 위치는 실험결과와 해석결과가 유사하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

개구제형 강박스 거더 실험체는 CFT 모듈에 의하여 프리스트레싱이 도입되어 있으므로, 사전에 도입된 프리스트레싱을 고려하기 위하여 유한요소해석 결과에

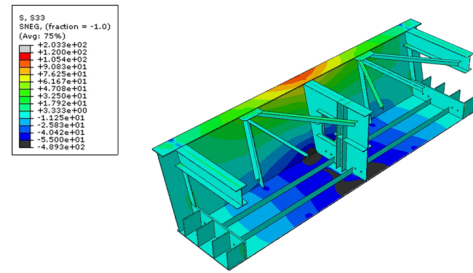


(a) Design load(1,695 kN)

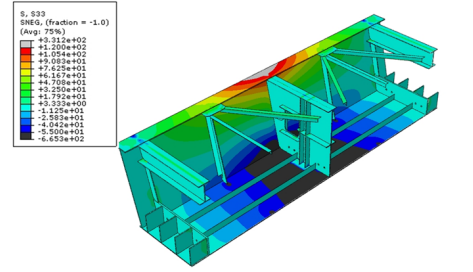


(b) Final load(2,200 kN)

Fig. 10. The stress contour of the loading test with CFT model



(a) w/o CFT module - Final load(1,695 kN)



(b) w/o CFT module - Final load(2,200 kN)

Fig. 12. The stress contour of the loading test without CFT model

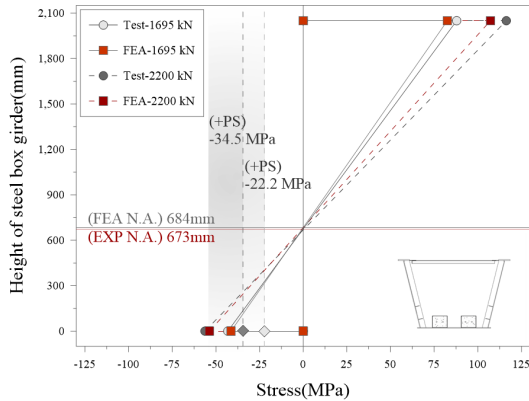


Fig. 11. Comparison of cross-sectional stress distribution of load test and FE analysis

Table 2. Verification of FE analysis and loading test results

		Stress (MPa)		FEA /Test	y_b (mm)		FEA /Test
		FEA	Test		FEA	Test	
Design Load	Upper Fl.	82.6	87.9	0.94	684	673	1.02
	Lower Fl.	-41.4	-43.2	0.96			
Final Load	Upper Fl.	107.3	116.3	0.92			
	Lower Fl.	-53.7	-56.3	0.95			

대하여 프리스트레스 결과를 중첩한 하부플랜지의 응력은 설계하중 상태에서 -22.2 MPa, 최종하중 상태에서 -34.5 MPa 수준으로 나타났다. 프리스트레스를 고려한 하중재하 시험결과에 따라서 설계하중상태에서 프리스트레싱 도입으로 설계응력의 약 53 % 수준으로 응력을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한 CFT 단면에 의한 단면 강성 증가로 강박스 거더 단면을 효율적으로 사용할 수 있음을 확인할 수 있다.

3.3 CFT 모듈 단면 변화에 따른 강박스 거더 응력 비교

CFT 모듈에 의한 강성효과를 비교하기 위하여 CFT 모듈없이 종방향 보강재만 설치한 경우와 CFT 모듈의 폭을 600 mm, 650 mm, 700 mm, 높이를 500 mm, 550 mm, 600 mm로 변화시킨 경우에 대한 강박스 거더의 강성 변화를 유한요소해석 결과를 통하여 비교하였다. Fig. 12는 CFT 모듈 없이 종방향 보강재만을 설치한 강박스 거더의 설계하중에 대한 응력분포이며, CFT 모듈이 설치된 강박스 거더의 단면응력 분포를 Fig. 13과 Table 3에 비교하여 나타내었다. Fig. 13과 Table 3에 나타난 것과 같이 CFT 모듈을 대신하여 종방향 보강재가 설치된 강박스 거더의 경우 CFT 모듈이 설치된 강박스

CFT 모듈을 이용한 단면개선 연속 강박스 거더의 하중저항 효과 분석

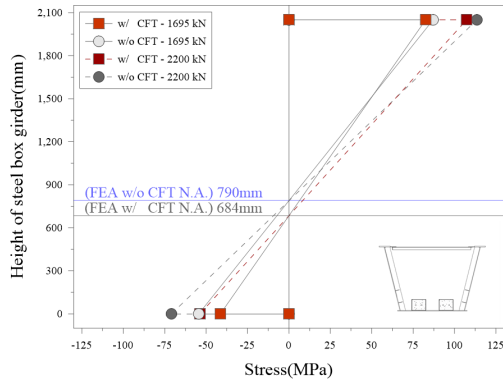


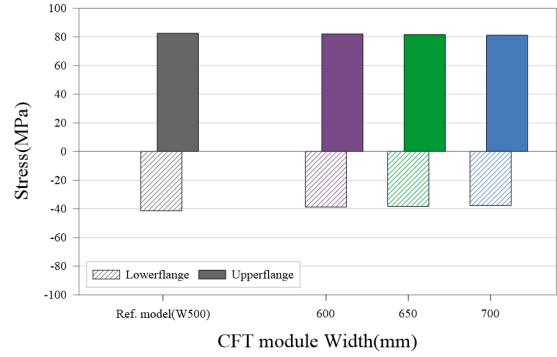
Fig. 13. Comparison of cross-sectional stress distribution of with CFT girder and without CFT girder

Table 3. Comparison sectional stress of with CFT model and without CFT model

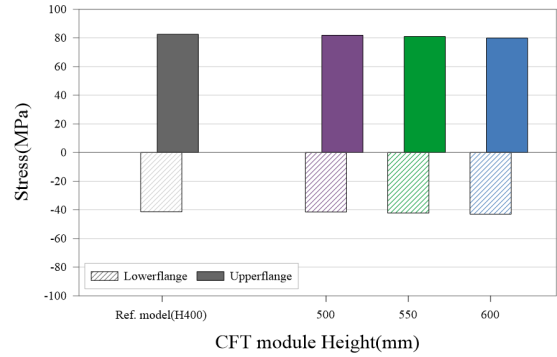
		Stress (MPa)			y_b (mm)		
		w/o (A)	w/ (B)	(A) / (B)	w/o (A)	w/ (B)	(A) / (B)
Design Load	Upper Fl.	87.0	82.6	1.05	790	684	1.15
	Lower Fl.	-54.5	-41.4	1.32			
Final Load	Upper Fl.	113.5	107.3	1.06			
	Lower Fl.	-71.0	-53.7	1.32			

거더에 비하여 30 % 수준의 응력이 증가하여 나타나고 있음을 알 수 있으며, 중립축 또한 15 % 수준으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 14과 Table 4는 유한요소해석결과 나타난 강박스에 설치된 CFT 모듈 제원에 따른 개구제형 강박스 거더의 단면응력을 비교하여 나타낸 것으로 설계하중 상태에서의 상부플랜지 및 하부플랜지 응력을 나타낸 것이다. Fig. 14과 Table 4에 나타난 것과 같이 CFT 모듈의 단면 폭이 증가함에 따라 단면응력수준이 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 CFT 모듈의 단면적이 증가하여 나타난 결과로 보여진다. 반면에, CFT 높이 증가로 인하여 하부플랜지의 응력수준이 최대 4 % 수준으로 증가하는 것으로 나타났다. CFT 모듈의 폭 증가에 따라 단면의 중립축이 하강하지만, CFT 모듈의 높이가 증가하면 상대적으로 단면 중립축이 상승하여 나타난 결과로 보여진다. 하지만, 이러한 결과는 강박스 거더에 설치되는 CFT 모듈의 단면효과만을 고려한 결과로, CFT 모듈의 단면적이 증가할 경우 도



(a) Width of CFT module



(b) Height of CFT module

Fig. 14. Results of CFT sectional parameter study

Table 4. Comparison sectional stress for CFT sectional condition

CFT module	Stress (MPa)		Result / Ref.		y_b (mm)	Result / Ref.	
	Upp.	Low.	Upp.	Low.			
Ref. (W500 × H400)	82.6	-41.4	1.00	1.00	684	1.00	
Width (mm)	600	82.1	-38.8	0.99	0.94	658	0.96
	650	81.7	-38.2	0.99	0.92	654	0.96
	700	81.2	-37.7	0.98	0.91	650	0.95
Height (mm)	500	81.9	-41.5	0.99	1.00	690	1.01
	550	81.0	-42.3	0.98	1.02	704	1.03
	600	80.0	-43.0	0.97	1.04	718	1.05

입가능한 프리스트레스 수준이 증가 할 수 있으므로 설계 응력수준과 강박스 거더의 폭 등을 고려하여 최적의 CFT 모듈의 제원을 결정할 수 있을 것이며, 사용하중 수준과 시간 등을 고려하여 CFT 모듈을 설계할 경우 개구제형 강박스 거더의 연속지점부 응력거동과 단면 합리화 방안으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

개구제형 강박스 거더의 연속지점부 단면 개선을 위한 방법으로 CFT 모듈을 이용한 프리스트레싱에 대한 단면개선 효과를 확인하기 위하여 CFT 모듈을 이용한 프리스트레싱 시험과 하중재하 시험을 수행하였다. 프리스트레싱 시험과 하중재하 시험은 3차원 유한요소해석을 통하여 검증한 뒤 CFT 모듈의 제원 변화에 따른 강박스 거더의 단면개선 효과를 분석하였다. 본 연구에서 나타난 결과는 다음과 같다.

- (1) CFT 모듈에 도입된 프리스트레싱력의 제거를 통하여 CFT 모듈과 합성된 강박스 거더에 프리스트레스 효과가 도입되어 하부플랜지에 인장응력이 도입되는 것을 실험적으로 확인하였다. 또한, CFT 모듈을 이용한 프리스트레싱 시험은 유한요소해석을 통하여 검증하였으며 이러한 결과를 통하여 CFT 모듈을 이용한 강박스 거더의 프리스트레싱이 연속강박스 거더의 부모멘트 구간의 하부플랜지에 발생하는 압축응력을 저감 시킬 수 있음을 확인하였다.
- (2) 하중재하 시험을 통하여 CFT 모듈과 일체화를 통하여 강합성 거더의 하중 저항 성능이 향상되고 있음을 확인하였으며, 이를 3차원 유한요소해석을 통하여 확인하였다. 유한요소해석 모델을 이용하여 CFT 모듈을 설치한 모델과 CFT 모듈을 대신하여 종방향 보강재로 대체한 모델을 하중재하 시험과 동일한 조건에서 비교한 결과 CFT 모듈을 설치한 모델의 경우 하부플랜지에 발생한 응력이 30 % 수준으로 감소한 것으로 확인되었다.
- (3) CFT 모듈의 폭과 높이에 따른 강합성 거더의 하중저항 성능에 대한 유한요소해석 결과, CFT 모듈의 폭을 증가시킨 모델의 경우 하부플랜지에 발생하는 응력수준이 감소하였으며 이러한 결과는 강박스 거더의 단면적 증가와 중립축의 하강으로 인하여 나타난 결과로 판단된다. 하지만 CFT 모듈의 높이가 증가할 경우 강박스 거더의 단면적이 증가함과 동시에 단면 중립축이 상승하여 하부플랜지에 발생하는 응력수준이 증가하였

다. 이는 강박스 거더에 설치되는 CFT 모듈의 단면효과만을 고려한 결과로, CFT 모듈의 단면적이 커질 경우 도입가능한 프리스트레싱력의 수준도 증가할 것이므로 이를 고려하여 연속지점부 강박스 거더에 필요한 설계응력수준에 적합한 CFT 모듈의 제원과 프리스트레싱 도입 수준을 결정할 수 있을 것이다.

본 연구를 통하여 CFT 모듈을 이용한 프리스트레싱에 대하여 실험적 및 해석적으로 검토해보았으며, 이러한 단면 개선방법은 향후 현장 적용 가능성을 검토하기 위해서 다양한 구조적 조건과 부재의 세부사항을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업(과제번호: 22CTAP-C163558-02)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌(References)

- [1] Saul, R. (1996) Bridges with Double Composite Action, *Structural Engineering International*, Taylor & Francis, Vol.6, No.1, pp.32-36, <https://doi.org/10.2749/101686696780496067>.
- [2] Choi, H.Y., Suh, S.K., Oh, M.S., Oh, S.H., and Kim, H.S. (2007) Temporary Stresses by Applying Construction Methods for Continuous Steel-Concrete Double Composite Box Girder Bridges, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.19, No.6, pp.681-693 (in Korean).
- [3] Cho, E.Y., and Shin, D.K. (2007) Flexural Design of Double Composite Box Girder over Interior Pier by LRFD Method, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.19, No.6, pp.737-750 (in Korean).
- [4] Kim, H.-H., and Shim, C.-S. (2009) Experimental Investigation of Double Composite Twin-Girder Railway Bridges, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.65, No.6, pp.1355-1365,

- <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.02.004>.
- [5] Shim, C.S., Whang, J.W., Chung, C.H., and Lee, P.G. (2011) Design of Double Composite Bridges using High Strength Steel, *Procedia Engineering*, Elsevier, Vol.14, pp.1825-1829, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.229>.
- [6] Xu, C., Su, Q., Wu, C., and Sugiura, K. (2011) Experimental Study on Double Composite Action in the Negative Flexural Region of Two-Span Continuous Composite Box Girder, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.67, No.10, pp.1636-1648, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.04.007>.
- [7] Su, H., Su, Q., Xu, C., Casas, J.R., and Zhou, G. (2022) Mechanical Performance Based Rationalization Research on Steel-Concrete Double Composite Action, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.197, 107492, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107492>.
- [8] Kim, H.H., Shim, C.S., Yun K.J., and Lee, P.G. (2005) Evaluation of Static Strength of Mixed Stud Shear Connection in Double Composite Bridges, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.17, No.5, pp.549-559 (in Korean).
- [9] Shim, C.S., Kim, H.H., and Yun, K.J. (2006) Behavior of Negative Moment Region of Continuous Double Composite Railway Bridges, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.18, No.3, pp.339-347 (in Korean).
- [10] Chen, S. (2005) Experimental Study of Prestressed Steel-Concrete Composite Beams with External Tendons for Negative Moments, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.61, No.12, pp.1613-1630, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2005.05.005>.
- [11] Choi, D.-H., Yoo, H., Kim, Y.-S., and Kim, S.-W. (2009) Strengthening Design Using Rating Factor Considering Increment of Tendon Force for Two-Span Steel-concrete Composite Bridges Strengthened by Straight External Tendons, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.13, No.2, pp.153-164, <https://doi.org/10.11112/jksmi.2009.13.2.153> (in Korean).
- [12] Park, S., Kim, T., and Hong, S.-N. (2010) Flexural Behavior of Continuous Steel Girder with External Post-Tensioning and Section Enhancement, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.66, No.2, pp.248-255, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.09.003>.
- [13] Lou, T., and Karavasilis, T.L. (2019) Numerical Evaluation of Prestressed Steel-Concrete Composite Girders with External FRP or Steel Tendons, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.162, 105698, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105698>.
- [14] Ryu, H.-K., Shim, C.-S., Chang, S.-P., and Chung, C.-H. (2004) Inelastic Behaviour of Externally Prestressed Continuous Composite Box-Girder Bridge with Prefabricated Slabs, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.60, No.7, pp.989-1005, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2003.09.004>.
- [15] Su, Q., Yang, G., and Bradford, M.A. (2015) Behavior of a Continuous Composite Box Girder with a Prefabricated Prestressed-Concrete Slab in Its Hogging-Moment Region, *Journal of Bridge Engineering*, The American Society of Civil Engineers, Vol.20, No.8, B4014004, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000698](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000698).
- [16] Long, G., Zhou, R., Ma, H., Xin, G., Emadi, S., and Shi, X. (2022) Experimental and Numerical Study on UHPC-RC Decks within Hogging Moment Region, *Applied Sciences*, MDPI, Vol.12, No.22, 11446, <https://doi.org/10.3390/app122211446>.
- [17] Kang, B.-S., Ju, Y.-T., and Lee, Y.-H. (2006) Flexural Behaviors of PSC Composite Girders in Negative Moment Regions, *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, Vol.18, No.2, pp.169-176, <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2006.18.2.169> (in Korean).
- [18] Choi, Y.H. (2012) Limitations on the Width-to-Thickness Ratio of Rectangular Concrete-Filled Tubular (CFT) Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.4, pp.451-458, <http://dx.doi.org/10.7781/kjoss.2012.24.4.451> (in Korean).
- [19] Lee, C.H., Ryu, I., Shin, D.J., Koo, J.H., and Yom, K.S. (2021) Prediction of Temperature Distribution and Strength of Unprotected Mega CFT Columns Exposed to Standard Fire, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.1, pp.1-10, <http://dx.doi.org/10.7781/kjoss.2021.33.1.001> (in Korean).
- [20] Oh, J.Y., Lee, S.J., Jeon, J.W., Choi, S.-M., and Yang, I.S. (2021) An Experimental Study on the CFT Column in which the Tensile Force Acts in the Axial Perpendicular Direction through the Steel Plate, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.6, pp.395-401, <https://doi.org/10.7781/kjoss.2021.33.6.395> (in Korean).
- [21] Lee, B.-H., and Seo, S.-Y. (2022) Development and

- Structural Behaviors of New Vertical-Diaphragm Connections to CFT Column-H Beam Under Cyclic Loading, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, No.6, pp.363-372, <https://doi.org/10.7781/kjoss.2022.34.6.363> (in Korean).
- [22] Lee, H.J., Kim, R.-H., Cho, K.-I., and Ahn, J.-H. (2022) Prestressing Inducing Effect of Continuous Open-Top Steel Box Girder Using Modular CFT Members, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.26, No.3, pp.111-119, <https://doi.org/10.11112/jksmi.2022.26.3.111> (in Korean).
- [23] Korean Society of Steel Construction (2017) *Design Standard for Steel Structural Members (Load & Resistance Factor Design)*, KDS 14 31 10 : 2017, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korean).
- [24] Kim, Y.-A., and Kim, J.-K. (2022) Evaluation of Prestress Loss of Steel Box Girder Reinforced with Prestressed CFT Due to Creep, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, No.6, pp.383-392, <https://doi.org/10.7781/kjoss.2022.34.6.383> (in Korean).
- [25] Dassault Systèmes Simulia (2014) *ABAQUS 6.14: Abaqus Analysis User's Guide*, DSS, USA.
- [26] Hognestad, E. (1951) A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members, *University of Illinois Bulletin*, UIUC, Vol.49, No.22, pp.43-54.

요 약: CFT 모듈을 이용한 개구제형 연속 강박스 거더의 단면응력 개선방법은 부모멘트 영역의 강박스 내부에 콘크리트 충전 강관(CFT) 모듈을 설치하여 단면력을 향상시키고 추가적인 프리스트레싱을 도입하여 하부플랜지의 응력상태를 개선하는 공법이다. 본 연구에서는 CFT 모듈을 이용한 연속 강박스 거더의 단면응력 개선방법의 효과를 알아보기 위하여 실험과 수치해석을 수행하였으며, 이를 위하여 하부플랜지에 CFT 모듈을 설치한 강박스 시험체를 제작하고 프리스트레싱 하였고 3점 휨시험을 실시하여 시험체의 단면응력 거동을 확인하였다. CFT 모듈을 이용한 프리스트레싱과 3점 휨시험은 유한요소해석을 통하여 검증하였으며 검증된 모델을 이용하여 CFT 모듈의 제원에 따라 변화하는 단면응력상태를 비교하였다. CFT 모듈의 제원에 따른 유한요소해석 결과, 강박스 거더 내부에 CFT 모듈의 설치함으로써 강박스 거더의 단면적이 증가하여 단면의 강성을 높일 수 있고, 추가적인 프리스트레싱을 도입하여 부모멘트 영역의 강박스 거더 단면을 개선시킬 수 있는 것으로 나타났다.

핵심용어: 개구제형 연속 강박스 거더, 부모멘트 영역, CFT 모듈, 프리스트레싱 시험, 휨 시험
