DSCT 파일과 강재 파일을 적용한 잔교의 거동 비교 분석

A Comparative Study of Piers with DSCT and Steel Piles

홍혜민* · 김성원** · 한택희***

Hong, Hyemin*, Kim, Sungwon**, and Han, Taek Hee***

Abstract

Because of climate changes, the demand for securing marine space is increasing owing to problems such as sea level rise, design wave height increase, and lack of land and space, and research on the development of a new high-performance pier has been conducted. In the existing pier supported by steel piles, buckling failure and corrosion problems may lead to a risk of structural safety, and maintenance is difficult owing to a narrow span. The new type of double-skinned composite tubular (DSCT) structure, which has been extensively studied recently, is filled with concrete between the inner and outer tubes, increasing the strength of concrete because of the three-axis confined effect. In addition, it is advantageous in terms of ductility. Furthermore, owing to the hollow cross-section, it is economical because it weighs less than the concrete-filled steel tubular (CFT) structure, effectively saving materials. In this study, the performance of a pier with 30 steel piles and that of a pier supported with 20 DSCT piles was compared under the same external force through finite element analysis. Consequently, it was confirmed that the pier with DSCT piles showed higher performance in displacement and stress than the existing pier with steel piles.

Key words : Pier Analysis, DSCT, Finite Element Analysis, Performance Evaluation of Pile

요 지

기후변화에 따라 해수면 상승, 설계 파고 증가 및 육상공간의 부족 등의 문제로 해상 공간자원 확보 요구가 증가하고 있으며, 형고가 증가된 잔교 개발에 대한 연구가 진행되어 오고 있다. 기존 강재 파일 잔교의 경우, 좌굴파괴 및 부식 문제를 발생시켜 구조물의 안전성 위험을 초래할 수 있으며, 좁은 지간으로 인해 유지보수에 대한 어려움이 있다. 최근 많은 연구가 진행된 double-skinned composite tubular (DSCT) 신형식 구조는 내측 및 외측관 사이에 콘크리트가 충전되어 3축 구속효과로 콘크리트의 강도가 증가하며, 연성도 측면에서 유리하다. 또한, 일반 중실 콘크리트 구조 대비 자중이 작아 재료에 대한 절감 효과가 있어 경제적이다. 본 연구에서는 동일 외력 작용시, 파일 개수가 30본인 기존 강재 잔교와 20본의 DSCT 파일로 지지하는 잔교에 대하여 유한요소해석을 수행하고 성능을 비교하였다. 해석 결과, DSCT 파일 적용 잔교의 경우, 변위 및 응력에서 기존 강재 파일 잔교보다 더 높은 성능을 보여주었다.

핵심용어 : 잔교해석, DSCT, 유한요소해석, 파일성능평가

1. 서 론

최근 기후변화로 인해 해수면의 높이가 상승함에 따라 설계 파고가 증가하고 육상 공간 부족문제로 해양 공간을

활용하는 연구가 활발히 진행되어 오고 있다(KIOST, 2021). 일본의 요코하마시 미나토미라이 21은 해역재생사업으로 개발된 워터프런트 공간이며, 잔교식 부두를 재정비하여 해상공간을 활용하고 있다. 미국 시애틀의 PIER 62/63

*정회원, 한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 기술원(E-mail: hyeminhong@kiost.ac.kr)

Member, Research Specialist, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

**정회원, 한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 기술원(E-mail: swkim@kiost.ac.kr)

Member, Research Specialist, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

***교신저자, 정회원, 한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 책임연구원(Tel: +82-51-664-3529, Fax: +82-51-664-3529, E-mail: taekheehan@kiost.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Principal Research Scientist, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

(Fig. 1)의 경우, 오래된 목재파일 및 데크를 제거한 후 강재 파일과 상부 콘크리트로 교체하여 해상 공간을 활용하고 있다. 이 외에도 일본 하네다 공항, 홍콩 구룡 반도 및 허버시티(Fig. 2) 등 잔교 형식을 적용한 공간 활용이 증가하고 있다(KIOST, 2017).

현재까지 해상공간은 대체로 매립식을 이용한 개발이 이루어져 왔으나, 수심이 깊어질수록 건설비용이 높고 해양 환경 오염 발생 및 침하 문제로 인해(KEI, 2005; Yeongnam Ilbo, 2016) 신형식 고성능 잔교 형식의 구조물 개발에 대한 연구가 증가하고 있다(KIOST, 2017). 또한, 기존의 잔교는 좁은 지간으로 설계되어 유지보수에 대한 어려움이 있으며, 대부분의 잔교 파일은 단일 강관 또는 철근콘크리트로 제작되어 장기간 해양 환경에 노출시 Fig. 3과 같이 부식, 균열,

Fig. 1. Seattle Waterfront (Lane, 2020)

Fig. 2. Star Ferry Pier at Hong Kong Central (Tuderna, 2010)

Fig. 3. Corrosion of Steel Pile (Chemcote, 2021) and Rebar Exposure (Julie and Galbraith, 2016)

콘크리트 탈락, 파손, 철근 노출 등이 발생하기 쉬우며, 이는 파일의 성능을 저하시키는 원인으로 구조물의 안전성 위험을 초래할 수 있다(Lee, 2013).

이러한 문제를 해결하기 위해서는 고성능의 신형식 파일 구조의 개발이 필요하다. 신형식 Double Skinned Composite Tubular (DSCT) 구조는 Figs. 4와 5와 같은 형상으로 콘크리트가 내측 및 외측 관 사이에 충전되어 3축 방향으로 완전히 구속되며, 이로 인해 높은 강도와 연성도를 가진다. 또한, 내측 관에 의해 생성된 중공 단면은 재료를 절감시킬 수 있어 경제적이다.

콘크리트의 구속응력은 Fig. 6의 자유물체도로부터 유도되며, 강관을 따라 균일하게 작용하고, 외부 강관이 내부 강관보다 먼저 항복된다는 가정 하에서 아치의 반력으로써

Fig. 4. Cross-Section of DSCT Column (Han et al., 2007)

Fig. 5. Triaxially Confined Concrete in DSCT Column (Han et al., 2007)

Fig. 6. Confining Stress on Concrete in a DSCT Column (Han et al., 2013)

구속응력이 계산된다. 여기서, f_{lc} 는 원주방향의 구속응력, f_{lr} 은 방사방향의 구속응력으로 f_{lc} 와 f_{lr} 이 동일한 값을 갖는다고 가정하여 f_l 로 표현하였다. D_i 는 중공의 직경, f_{tube} 는 내부 강관에 작용하는 응력이며, t 는 내부 강관의 두께이다 (Han et al., 2007).

최근 신형식 DSCT 구조를 적용한 대형구조물 관련 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 부식에 취약한 해양구조물의 내구성 및 내부식 성능 향상을 위한 복합소재개발 연구도 진행되고 있다(Han et al., 2016; Hong et al., 2016a, 2016b; Yi and Han, 2016; Han et al., 2018; Hong et al., 2020).

Han et al. (2013)은 강재 관 및 FRP 관을 적용한 DSCT 풍력 타워를 제안하고 기존 강재 풍력타워 대비 직경이 감소된 DSCT 풍력 타워의 단면을 설계하였으며, 이는 풍력 타워로서 충분히 적용 가능하다는 것을 확인하였다. 또한, DSCT 구조를 적용한 3.6 MW급 및 5.0 MW급 풍력 타워의 단면을 설계하는 연구도 진행하였다(Han et al., 2015). Hong et al. (2019)은 부식에 강한 GFRP가 적용된 DSCT 보의 성능을 실험적으로 확인하고 해중터널에의 적용 가능성을 확인하였으며, 모듈형 FRP DSCT 기둥의 휨성능 실험평가를 통하여 연결부 성능 향상 시 우수한 성능을 발휘하는 풍력타워의 설계에 대한 연구도 진행하였다(Hong et al., 2018).

본 연구에서는 기존 잔교의 강재 파일 외경을 적용한 DSCT 파일의 단면을 설계하고 파일 개수가 30본인 기존 강재 잔교와 20본의 DSCT 파일로 지지하는 잔교에 대하여 성능 비교를 하였다.

2. 잔교 DSCT 파일 단면 설계

DSCT 파일의 단면은 Han et al. (2013)의 해석모델이 적용된 AutoDSCT 자동설계 프로그램(KIOST, 2014)을 사용하여 설계하였다. 설계하고자 하는 기둥 단면의 외경 및 재료의 물성치와 최소 요구성능인 축력 및 모멘트를 프로그램에 입력하면, 70%~97%의 중공비에 따라 10개의 단면을 자동으로 설계한다. Fig. 7은 AutoDSCT 프로그램에서의 단면 설계 순서도를 나타내며, 프로그램 상에서 각 단면에 대하여 축력-모멘트의 상관관계를 해석하고 최소 요구성능을 만족하는 10개의 최적단면을 산출한다(Han et al., 2013).

잔교 DSCT 파일의 단면은 OO 부두 공사에 사용된 직경 711.2 mm 및 두께 14 mm의 기존 강재 파일 잔교의 재원을 참고하여 설계하였다. 기존 강재 파일과 동일한 외경을 가진 DSCT 단면 산출을 위해 계산된 기존 강재 파일의 최대 축력 및 휨강도는 각각 10,047.2 kN 및 3,713.5 kN-m이며, DSCT 단면 설계시, 기존 강재 파일과 동등한 요구성능을 가진 단면을 산출하기 위해 동일 축력 및 휨강도 값을 사용하였다.

DSCT 단면 산출에는 KIOST에서 개발된 AutoDSCT 자동 단면 설계 프로그램(Han et al., 2013)을 사용하였으며, 적용 재료물성치는 내측 및 외측 강관의 항복강도 315 MPa 및 극한강도 490 MPa이며, 콘크리트의 경우, 압축강도를 40 MPa로 적용하였다. 계산된 축력 및 휨강도 값을 적용하여 최소 요구성능에 만족하는 10개의 DSCT 단면을 Table 1과 같이 산출하였다. Fig. 8은 설계된 DSCT 파일 단면과 강재

Fig. 7. Design Process in Developed Program (Han et al., 2013)

Fig. 8. P-M Interactive Curves of Steel and DSCT Piles

Table 1. Suggested Sections for DSCT Pile

Section design cases	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8	Case9	Case10
Outer Diameter (mm)	711.2	711.2	711.2	711.2	711.2	711.2	711.2	711.2	711.2	711.2
Diameter of Hollow Section (mm)	689.9	668.5	647.2	625.9	604.5	583.2	561.8	540.5	519.2	497.8
Hollow Ratio	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7
Thickness of Outer Tube (mm)	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	11.0	11.0	11.5	11.5
Thickness of Inner Tube (mm)	11.2	10.9	10.5	10.2	9.8	9.5	9.6	9.2	9.2	8.9

파일 단면에 대한 축력-모멘트 상관도(P-M 상관도)를 나타내며, 산출된 10개의 DSCT 단면은 최소 요구성능을 모두 만족하는 것으로 확인되었다.

산출된 10개의 단면 중 가장 경제적인 단면인 Case 1을 잔교 파일에 적용하여 기존 강재 파일을 적용한 잔교와 성능 비교를 하였다.

기존 강재 파일 잔교의 경우, 지간이 6,000 mm이며 30본의 파일이 사용되었다. 본 연구에서는 고성능 합성 구조인 DSCT 파일을 활용하여 지간 간격의 목표를 1,500 mm 증가된 7,500 mm로 설정하고 파일의 개수를 20본으로 감소시켜 경제성을 높이고 파일의 강도 성능을 확인하였다.

3. 유한요소해석

강재 파일 및 DSCT 파일이 적용된 잔교 성능 비교를 위하여 유한요소 해석을 수행하였으며, 해석에는 ANSYS Workbench 프로그램(ANSYS, 2021)이 사용되었다.

3.1 해석 모델

본 연구에서 사용된 잔교의 제원은 기존 강재 파일 잔교 정보를 참고하였으며, Fig 9와 같이 각 잔교의 슬래브 크기는

Fig. 9. Dimension of Pier with Steel Piles

Fig. 10. Dimension of Pier with DSCT Piles

34.0 m × 29.2 m × 1.5 m이다. 각 파일의 높이는 18.0 m로 동일하며, 강재 파일 간의 간격은 각각 가로 6.0 m 및 세로 6.3 m로 총 30기의 파일을 배치하였다. DSCT 파일의 경우, 가로 7.5 m 및 세로 8.4 m의 간격으로 20기의 파일을 Fig. 10과 같이 위치시켰다. 해석에 사용된 강재 및 콘크리트 물성치는 DSCT 단면 산출시 사용하였던 물성치(Table 2)와 같으며, 강재는 SKK490을 사용하였다. 강관은 4Node Shell 요소로 모사하였으며, 콘크리트의 경우, 20-Node Solid 요소로 모델링하였다. Fig. 11은 강재 파일 잔교의 모델링 형상을 나타낸다.

3.2 경계조건 및 하중 조건

강재 파일 및 DSCT 파일이 적용된 잔교 해석 시, 파일 전체의 하단을 Fig. 12와 같이 Fixed Support를 이용하여

Table 2. Material Properties

Material properties	
Compressive strength of concrete	40 MPa
Yield strength of steel	315 MPa
Ultimate strength of steel	490 MPa
Young's modulus of steel	210,000 MPa

Fig. 11. Model Shape

Fig. 12. Boundary and Load Conditions

병진 자유도 및 회전을 모두 구속시키는 경계조건을 구현하였다. 와 각 파일의 연결부는 해석 Tool 안의 Bonded 조건을 적용하여 부재간의 접촉면이 떨어지지 않고 미끄러짐이 불가능하도록 하였다.

본 연구의 목적은 기존 강재 파일 잔교 및 파일 수가 적은 DSCT 잔교의 성능을 비교 및 평가하기 위한 것으로 각 잔교에 작용하는 하중은 KALIS (2018)에서 부두 안전성 평가시 사용된 횡하중으로 동일한 위치에 동일한 하중 1,000 kN을 재하하는(Fig. 12) 경우로 가정하였으며, 그 이외의 하중으로는 자중만을 고려하였다.

4. 해석 결과 및 비교

앞서 언급한 것과 같이 본 연구는 강재 파일 잔교 및 파일 개수가 적은 DSCT 잔교의 성능을 비교하기 위한 것으로 안전성 기준을 강재의 항복강도로 선정하였다.

강재 파일 30본 적용 잔교 해석을 수행하였으며, 해석 결과는 Figs. 13과 14와 같이 구조물에 발생한 변위는 40.4 mm이며, 응력은 101.6 MPa로 강재의 항복강도 내로 발생하였다.

DSCT 파일 20본이 적용된 잔교의 성능을 확인하기 위한 해석을 수행하였다. 앞서 산출된 10개의 DSCT 단면 중 가장 경제적인 단면을 가진 Case 1을 적용한 DSCT 파일 잔교 해석 결과, Figs. 15와 16과 같이 강재 부재에 발생한 변위 및 최대응력은 각각 35.1 mm 및 101.4 MPa이며, 콘크리트에 발생한 응력은 37.7 MPa로 각 재료의 항복강도 이하로

발생하였다.

Table 3에 각 잔교에 대한 최대변위, 최대응력, 사용 강재량 및 각 파일의 지간 거리를 비교한 것을 정리하여 나타내었다. DSCT 파일 잔교에 발생한 최대변위 및 최대응력은 강재 파일 잔교 대비 각각 86.9% 및 99.8% 발생하였으며, 강재량의 경우, DSCT 파일 잔교가 기존 강재 잔교보다 0.3% 적게

Table 3. FEM Analysis Results

Pier Type	Pier with Steel Pile (Model ①)	Pier with DSCT pile (Model ②)	Ratio (②/①, %)
Max. Lateral Disp. (mm)	40.4	35.1	86.9
Max. Stress (MPa)	101.6	101.4	99.8
Steel Mass (ton)	135.2	134.8	99.7
Concrete Stress (MPa)	-	37.7	-
Longi._Span (m)	6.0	7.5	125
Trans._Span (m)	6.3	8.4	133
Supporting Area / Pier (m ²)	37.8	63	167

Fig. 13. Displacement (Pier with Steel Piles)

Fig. 15. Displacement (Pier with DSCT Piles)

Fig. 14. Von-mises Stress (Pier with Steel Piles)

Fig. 16. Von-mises Stress (Pier with DSCT Piles)

사용되었다. 또한, DSCT 파일 지간 거리가 기존 강재 파일 잔교보다 증가했음에도 불구하고, DSCT 파일이 적용된 잔교가 강재 파일 적용 잔교 보다 모든 성능 측면에서 더 높은 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존 강재 파일과 동일한 외경을 가진 DSCT 파일의 단면을 설계하고, 유한요소해석을 통해 파일 사이의 지간 거리가 증가한 DSCT 잔교와 기존 강재 파일 적용 잔교의 성능을 비교하였다.

해석시 적용된 각 파일의 개수는 강재 파일 30본 및 DSCT 파일 20본이며, DSCT 파일 잔교에 사용된 강재량은 134.8 ton으로 강재 파일 잔교보다 0.4 ton 적게 사용되었다.

해석 결과, DSCT 파일 잔교에 발생한 변위 및 응력은 기존 강재 파일 잔교 대비 13.1% 및 0.18% 감소하였으며, DSCT 파일 간의 지간 거리가 가로 및 세로 각각 25% 및 33% 증가했음에도 불구하고 기존 강재 파일 잔교 보다 성능이 더 높은 것을 확인하였다.

DSCT 파일 적용 잔교는 기존 강재 파일 잔교 보다 적은 파일 개수로도 고성능을 발휘하며, 장지간 설계가 가능하므로 유지관리의 편의성이 증대할 것으로 판단된다. 또한, 고성능 신형식 DSCT 파일은 교각 및 교량과 같은 대형 구조물 그리고 고형교 구조물 설계시에 적용 가능하며, 해수면 상승 및 재난 대응에 좋은 방안이 될 것으로 사료된다. 한편, 내측 및 외측 판의 강재 대신 복합재료를 적용한다면 강재 부식 및 철근 노출 등과 같은 문제도 해결 가능할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 “기후변화 적응형 다목적 국토확장 기술 개발(과제번호: 21CTAP-C164018-01)” 및 한국해양과학기술원(KIOST)의 “해양쓰레기 재활용 항만 구조물 수명연장 기술 개발(PE99933)”의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

ANSYS. (2021). *ANSYS Workbench Program*.
Chemcote. (2021). *Typical corrosion on a jetty*. Retrieved December 12, 2021, from <https://www.chemcote.com.au/underwater-protective-coatings/>
Julie, A., and Galbraith, P.E. (2016). *Use of FRP to strengthen and repair marine structures*. Retrieved December 9, 2021, from file:///F:/%EB%B0%B1%EC%97%85/06%20%ED%95%AD%EB%A7%8C%20%EC%9

D%B8%ED%94%84%EB%9D%BC%20%EA%B3%BC%EC%A0%9C/06%20%EC%A4%91%EA%B0%84%EB%B3%B4%EA%B3%A0%ED%9A%8C/_13_Julie_Galbraith_-_FRP_for_%ED%8C%8C%EC%9D%BC%20%EC%86%90%EC%83%81%20%EA%B4%80%EB%A0%A8%20%EB%B0%9C%ED%91%9C%EC%9E%90%EB%A3%8C.pdf
Han, T.H., Hong, H.M., and Lee, S.H. (2018). Experimental comparison for flexural behavior of concrete filled tubular and double-skinned composite tubular columns. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 4, pp. 233-241.
Han, T.H., Kim, S.N., and Kang, Y.J. (2007). Evaluation of seismic performance for an internally confined hollow CFT column. *Journal of Steel Structures*, Vol. 1, pp. 53-65.
Han, T.H., Lee, S., Won, D., and Kim, J.J. (2016). Performance evaluation of joint connectors for modular DSCT wind turbine tower. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 5, pp. 209-220.
Han, T.H., Park, Y.H., Won, D., and Lee, J.H. (2015). Design feasibility of double-skinned composite tubular wind turbine tower. *Wind and Structures*, Vol. 21, No. 6, pp. 727-753.
Han, T.H., Won, D., and Kim, S. (2013). Applicability of double-skinned composite tubular member for offshore wind turbine tower. *Journal of KOSHAM*, Vol. 13, No. 4, pp. 55-65.
Hong, H., Kim, S., and Han, T.H. (2016a). *Section design of DSCT tower supporting wind and tidal power turbines*. OCEANS 2016 MTS/IEEE, Monterey, USA.
Hong, H., Kim, S., and Han, T.H. (2016b). *Standard section design of FRP DSCT tower supporting 3 MW wind turbine*. 3rd Australasia and South East Asia Conference in Structural Engineering and Construction (ASEA SEC-3), Kuching, Malaysia.
Hong, H., Kim, S., and Han, T.H. (2020). Section design of 3 MW wind turbine tower applied by GFRP DSCT structure by bending test. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 20, No. 5, pp. 175-184.
Hong, H., Kim, S., Kim, J.J., and Han, T.H. (2019). Feasibility study on the application of a GFRP DSCT beam to a submerged floating tunnel by bending test. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 5, pp. 167-175.
Hong, H., Kim, S., Yoon, G., Oh, M., and Han, T.H. (2018). Experimental bending strength evaluation of modular FRP DSCT column. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*

Vol. 18, No. 7, pp. 323-332.

- KALIS. (2018). *A study on condition assessment and safety assessment criteria for port jacket facilities*. Korea Authority of Land & Infrastructure Safety.
- KEI. (2005). *A study on effective mitigation measures for environmental impacts of oceanic reclamation projects*. Ministry of Environment.
- KIOST. (2014). *AutoDSCT program version 1.1*.
- KIOST. (2017). *Regeneration of sea areas for sustainable development of coastal areas*. Korea Institute of Ocean Science and Technology.
- KIOST. (2021). *Planning for technology development to create and utilize undersea space*. Korea Institute of Ocean Science and Technology.
- Lane, B. (2020). *12 top-rated things to do in seattle in winter*. Retrieved December 9, 2021, from <https://www.planetware.com/washington/top-rated-things-to-do-in-seattle-in-winter-us-wa-162.htm>
- Lee, J.K. (2013). Special issue : An introduction of seawater corrosion resistance steel, poseidon500, for port &

offshore structures. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*. Vol. 6, No. 2, pp. 59-63.

- Tuderna. (2010). *Star ferry pier at hong kong central*. Retrieved December 9, 2021, from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Star_Ferry_Pier_at_Hong_Kong_Central_-_panoramio.jpg
- Yeongnam Ilbo. (2016). *Offshore Airport, it is hard to expand even if it's 12.4m deep and shallow for 18 years*. Retrieved December 9, 2021, from <https://www.yeongnam.com/web/view.php?key=20160610.010030711550001>
- Yi, J.H., and Han, T.H. (2016). Reliability analysis on wind turbine tower structures with composite section. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 4, pp. 185-194.

Received	November 10, 2021
Revised	November 10, 2021
Accepted	November 17, 2021