Journal of Korean Society of Steel Construction
Vol.38, No.5, pp.251-260, October, 2026

ISSN(print) 1226-363X ISSN(online) 2287-4054
DOI https://doi.org/10.7781/kjoss.2026.38.5.251

콘크리트 충전 강관 교량 교각의 차량 충돌 성능 평가

이승철[1] · 왕길환[2] · 전종수[3*]

[1]석박통합과정, 한양대학교, 건설환경공학과, [2]박사수료, 한양대학교, 건설환경공학과, [3]교수, 한양대학교, 건설환경공학과

Performance Assessment of Concrete-Filled Steel Tube Bridge Piers under Vehicle Collision

Lee, Seungcheol[1], Wang, Gil Hwan[2], Jeon, Jong-Su[3*]

[1]Combined M.S./Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea
[2]Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea
[3]Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

Abstract – This study investigated the vehicle impact behavior and damage of reinforced concrete (RC) and concrete-filled steel tube (CFT) bridge piers using LS-DYNA. The finite element model of the CFT pier was validated against impact test results. An RC pier and an equivalent CFT pier with comparable flexural and shear capacities were analyzed under an identical impact condition. The CFT pier exhibited lower maximum lateral displacement and less damage than the RC pier. Parametric analyses of the CFT pier showed that, among the structural parameters, pier diameter and steel tube thickness significantly affected lateral displacement, while impact velocity was the dominant impact-related parameter.

Keywords – Concrete-filled steel tube bridge pier, Vehicle collision, Post-impact damage, Finite element analysis, Lateral displacement

1. 서 론

콘크리트 충전 강관(Concrete-Filled Steel Tube, CFT) 기둥은 강관과 내부 콘크리트의 상호작용을 통해 우수한 구조 성능을 발휘한다. 강관은 내부 콘크리트에 횡구속 효과를 제공하여 압축 저항 및 연성 성능을 향상시키며, 내부 콘크리트는 강관의 국부좌굴 발생을 지연시켜 두 재료 간의 합성 거동을 효과적으로 발현시킨다[1]-[3]. 이러한 상호보완적 거동으로 인해 CFT 기둥은 기존 철근콘크리트(Reinforced Concrete, RC) 기둥에 비해 우수한 축하중 저항 성능과 변형 성능을 나타내는 것으로 보고되고 있으며[4]-[5], 이러한 장점을 바탕으로 교량의 교각 부재로 적용된 사례가 확인되고 있다[6].

Note.-Discussion open until April 30, 2027. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 24, 2026; revised on September 11, 2026; approved on September 13, 2026.
Copyright © 2026 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.
Tel. +82-2-2220-0324
E-mail. jongsujeon@hanyang.ac.kr

최근 교통량 증가로 인해 차량-교각 충돌 사고 사례가 증가하고 있다[7]. 교각의 충돌 손상은 교량의 내하성능 저하와 전체 붕괴로 이어질 수 있으며, 이는 교통 차단, 막대한 경제적 손실 및 인명 피해를 초래할 수 있다[8]. 따라서 교량 교각으로 적용이 확대되고 있는 CFT 기둥의 충돌 저항 성능에 대한 검토가 요구된다.

이와 관련하여 CFT 기둥의 충돌 거동에 관한 연구도 수행된 바 있다. Han *et al.*[9]은 낙하 충돌 실험을 통해 고정-고정 및 고정-핀 지지 조건의 CFT 기둥이 횡방향 충돌하중을 받을 때의 거동을 비교·분석하였다. 또한 Xu *et al.*[10]은 기둥 직경, 강관 두께, 충돌 속도 등 주요 변수가 CFT 기둥의 최대 횡방향 변위에 미치는 영향을 분석하였다. 그러나 이들 연구는 축소 부재 또는 단순화된 지지 조건을 대상으로 수행되었기 때문에, 실물 크기의 CFT 교각에서 변수들이 충돌 응답 및 손상 거동에 미치는 영향이 충분히 확인되었다고 보기는 어렵다.

한편, RC 기둥과 CFT 기둥의 구조 성능을 비교하기 위한 연구도 수행되어 왔다. Demartino *et al.*[11]은 RC 기둥과 CFT 기둥을 대상으로 횡방향 충돌 실험을 수행

하여 두 구조 형식의 충돌 응답 및 손상 양상을 비교하였다. 그러나 이 연구에서는 RC 기둥과 CFT 기둥이 유사한 구조 성능을 갖도록 등가 설계되지 않았기 때문에, 실험에서 나타난 충돌 응답의 차이가 구조 형식의 차이에 의한 것인지 혹은 단면 치수와 재료 강도 차이에 의한 것인지 명확히 구분하기 어렵다. 이러한 한계는 RC 단면을 CFT 단면으로 대체하는 등가 설계 방법을 통해 보완될 수 있으며, 이러한 등가 설계 방법은 Stephens *et al.*[12]의 연구에서 확인할 수 있다. 이 연구에서는 기존 RC 교각 단면을 휨강도 기준으로 CFT 교각 단면으로 등가 재설계하고, 두 구조 형식의 내진 성능을 비교하였다. 그러나 해당 연구는 지진하중 조건에서 두 구조 형식을 비교한 것으로, 충돌하중 조건에서 등가 설계된 RC 및 CFT 교각의 충돌 저항 성능 차이는 확인되지 않았다.

이에 본 연구에서는 LS-DYNA[13] 기반 수치해석 모델을 구축하고, 기존 충돌 실험 결과와의 비교를 통해 해석 모델의 타당성을 검증하고자 한다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 첫째, 동일한 차량 충돌 조건에서 실규모 RC 교각과 등가 설계된 CFT 교각의 동적 응답 및 손상 특성을 비교·분석하고, 둘째, CFT 교각을 대상으로 기둥의 형상, 재료 특성, 충돌 조건에 따른 매개변수 연구를 수행하여, 각 매개변수가 CFT 교각의 동적 응답 및 손상 거동에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 한다.

2. 유한요소 모델 구축 및 검증

2.1 CFT 기둥 충돌 모델 구축

콘크리트의 재료 모델로는 충돌 해석에 범용적으로 사용되는 Continuous Surface Cap Model (CSCM)을 채택하였다[14]. CSCM은 미국의 Federal Highway Administration에서 충격 하중을 받는 콘크리트 구조물의 거동 해석을 목적으로 개발된 모델로, 항복면과 캡면이 연속적으로 연결된 형태를 가져 압축 및 인장 영역에서의 콘크리트 비선형 거동을 효과적으로 표현할 수 있다[15]. 또한 변형률 속도 증가에 따른 동적 강도 증가 효과가 반영되어 있어 충돌 해석에 적합하다[16].

CFT 기둥의 강관에는 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 재료모델을 적용하였다. 이 모델은 Cowper-Symonds 식을 기반으로 변형률 속도 효과를 고려할 수 있어, 차량 충돌과 같은 고속 재하 조건에서 강재의 동적 거동을 모사하는 데 적합하다.

차량과 기둥 간의 충돌 접촉은 CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE를 사용하여 구현하였으며, 차량과 기둥 사이의 마찰계수는 0.3으로 설정하였다[17]. CFT 기둥의 강관과 내부 콘크리트 간의 접촉은 CONTACT_AUTOMATIC _SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK를 적용하여, 계면 응력이 설정된 부착강도를 초과하기 전까지 두 면이 부착된 상태를 유지하도록 모사하였다. 강관과 콘크리트 간의 부착강도는 Han *et al.*[18]의 식 (1)에 따라 산정하였으며, 마찰계수는 0.6으로 설정하였다[19].

$$\tau = 2.314 - 0.0195\frac{D}{t} \quad (1)$$

여기서, τ는 부착강도, D는 코어 콘크리트의 직경, t는 강관의 두께를 의미한다.

콘크리트는 계산 효율성을 고려하여 Constant Stress Solid Element로 모델링하였으며, 저감 적분 요소에서 발생할 수 있는 비물리적 Hourglass 모드를 억제하기 위해 Flanagan-Belytschko 강성 기반 Hourglass 제어를 적용하였다[20]. 강관은 해석 정확도와 계산 비용을 고려하여 Fully Integrated Shell Element로 모델링하였다[21].

Table 1. Key input parameter values of material models

Material	Parameter	Explanation	Value
Concrete	BETA	Tri-axial compression surface exponent	0.0192
	NC	Rate effects power for uniaxial compressive stress	0.78
	D	Brittle shape softening parameter	0.10
	NT	Rate effects power for uniaxial tensile stress	0.48
	PWRC	Shear-to-compression transition parameter	5.00
	PWRT	Shear-to-tension transition parameter	1.00
Steel	PR	Poisson's ratio	0.30
	SRC	Strain rate parameter, C	6844
	SRP	Strain rate parameter, P	3.91
	FS	Failure strain for eroding elements	0.20

수치해석에 사용된 콘크리트와 강관 재료 모델의 주요 입력 변수는 Table 1에 정리하였다.

2.2 유한요소 모델 검증

본 연구에서 적용한 재료 모델의 신뢰성을 검증하기 위해 CFT 기둥의 횡방향 충돌 실험을 재현하고, 실험 결과와 해석 결과를 비교하였다. CFT 기둥 모델은 Lin *et al.*[22]의 원형 기둥 횡방향 충돌 실험을 대상으로 검증하였다. CFT 기둥 실험체는 직경 300 mm, 높이 2,100 mm의 원형 CFT 기둥이며, 강관 두께는 5 mm이다. 실험은 약 1,580 kg의 모형 트럭을 충돌체로 사용하였으며, 기둥 하단이 고정되고 상단이 자유단인 캔틸레버 조건에서 횡방향 충돌하중을 가하였다. CFT 기둥은 기둥 하단으로부터 900 mm 높이에서 5.25 m/s의 충돌 속도 조건을 적용하였다. 실험의 충돌 과정은 Fig. 1에 나타냈으며 해석에 사용된 콘크리트와 강관의 주요 물성치는 Table 2에 정리하였다.

CFT 기둥 모델의 검증 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 검증은 최대 충격력과 최대 횡방향 변위를 기준으로 수행하였으며, 변위는 충돌부 근처인 기초부로부터 800 mm 높이에서 비교하였다. 5.25 m/s 충돌 조건에서 최대 충격력은 실험값 1,218 kN, 해석값 1,189 kN으로 3 % 이내의 오차를 보였고, 최대 횡방향 변위는 실험값 44.3 mm, 해석값 40.7 mm로 약 8 %의 오차를 나타냈다. 또한 해석 모델은 충돌 이후 기둥 하단부에서 발생한 강관의 국부좌굴 양상도 적절히 재현하였다. 따라서 구축된 CFT 기둥 모델은 횡방향 충돌하중에 따른 충격력, 변위 응답 및 국부 손상 거동을 합리적으로 모사할 수 있는 것으로 확인되었다.

3. 실교량 규모 충돌 해석 모델

3.1 RC 교각 모델

본 연구에서는 실교량 규모의 차량-교각 충돌 해석 모델을 구축하였다. RC 교각은 AASHTO LRFD 기준에 따라 설계된 Iowa County Road E-57 교량의 제원 및 재료 특성을 참고하여 모델링하였으며[23], 이 교각은 두 개의 원형 RC 기둥과 이를 연결하는 코핑으로 구

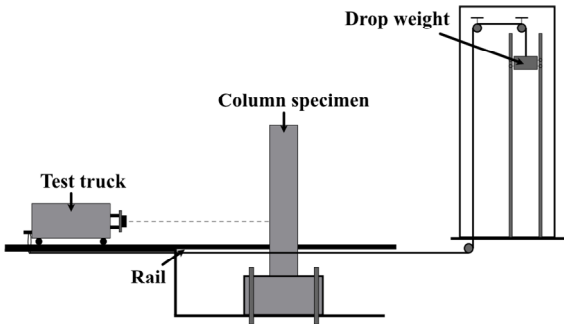
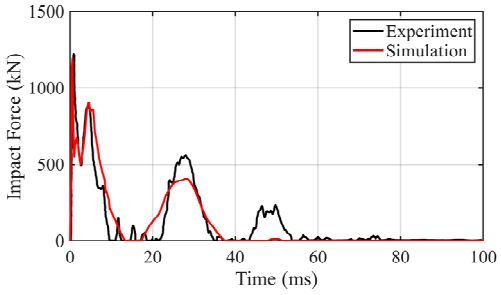


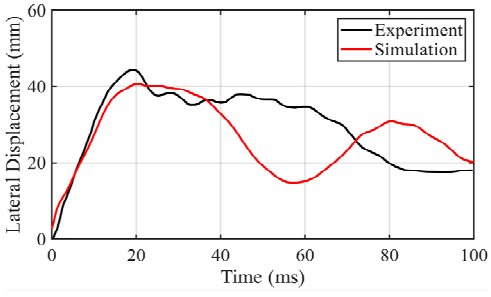
Fig. 1. Schematic of lateral impact experiment

Table 2. Material properties of the experimental specimen

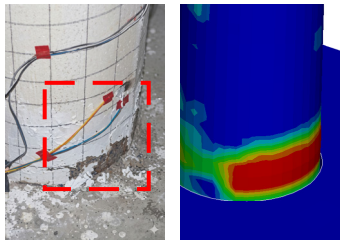
	Compressive strength (MPa)	Maximum aggregate size (mm)
Concrete	64	25
	Thickness (mm)	Yield strength (MPa)
Steel tube	5	525



(a) Impact force time history



(b) Lateral displacement



(c) Failure mode

Fig. 2. Comparison of experimental and numerical results for the CFT column

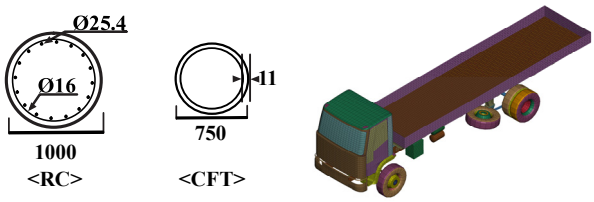
성된 2주식 교각 형식이다. 각 기둥의 직경과 높이는 각각 1,000 mm 및 6,400 mm이며, 콘크리트 피복 두께는 50 mm이다. 기둥 단면에는 직경 25.4 mm의 주철근 16개를 원주 방향으로 균등하게 배치하였고, 직경 15.9 mm의 나선형 횡보강철근을 100 mm 간격으로 배근하였다. 콘크리트 압축강도와 철근 항복강도는 각각 28 MPa 및 414 MPa로 적용하였다. 상부 구조에 의한 축하중은 코핑 상단에 배치한 질량 블록으로 이상화하였으며[24], 기초부는 선행 연구를 참고하여 모든 자유도를 구속한 고정단으로 설정하였다[25].

3.2 RC 교각 기반 CFT 교각 정적 등가 설계

RC 교각과 CFT 교각의 차량 충돌 응답을 비교하기 위해 두 구조 형식의 정적 저항 성능을 유사한 수준으로 설정하였다. 기존 내진성능 비교 연구에서는 RC 교각과 CFT 교각의 등가 설계 기준으로 휨강도를 활용한 바 있다[12]. 지진하중과 차량 충돌하중은 작용 방식에는 차이가 있으나, 두 하중 모두 교각에 횡방향 응답을 유발한다는 점에서 본 연구에서도 휨강도를 기본적인 등가 설계 기준으로 채택하였다. 또한 차량 충돌하중은 교각의 특정 위치에 집중적으로 작용하는 횡하중으로, 휨거동과 함께 전단거동도 유발할 수 있으므로 전단강도를 등가 설계 기준에 포함하였다.

각 교각의 정적 저항 성능은 구조 형식에 적합한 기준 및 산정 절차를 적용하여 평가하였다. 휨강도는 축력-모멘트(P-M) 상호작용 곡선을 통해 계산하였다. RC 교각의 경우 응력블록 계산을 통해 휨강도를 구하였으며, CFT 교각의 경우 AISC 기준 콘크리트 충전 강관 합성부재 강도 산정 방법을 적용하여 휨강도를 산정하였다[26]. 전단강도는 RC 교각의 경우 ACI[27] 기준에 따라 산정하였으며, CFT 교각의 경우 AISC[28] 기준에 따라 계산되었다.

CFT 교각의 충전 콘크리트 압축강도는 기존 RC 교각과 동일한 28 MPa로, 강관의 항복강도는 345 MPa로 적용하였다. CFT 기둥의 직경과 강관 두께는 기존 RC 교각과 유사한 정적 휨 및 전단 저항 성능을 확보하도록 반복 계산을 통해 결정하였다. 그 결과, 직경 750 mm, 강관 두께 11 mm의 CFT 단면에서 휨강도와 전단강도는 각각 2,158 kN·m 및 2,643 kN으로 산정되었으며, RC 교각의 휨강도 2,113 kN·m 및 전단강도 2,632 kN과 비교하여 각각 약 2.1 %와 0.4 %의 차이를 나타냈다. 이에 따라 해당 CFT 단면을 등가 설계 단면으로 선정하였으며, RC 및 CFT 교각의 단면 형상은 Fig. 3에 나타내었다.



(a) Cross-sections of RC and CFT piers (b) Finite element model of the vehicle

Fig. 3. Pier cross-sections and vehicle model

3.3 차량 유한요소 모델

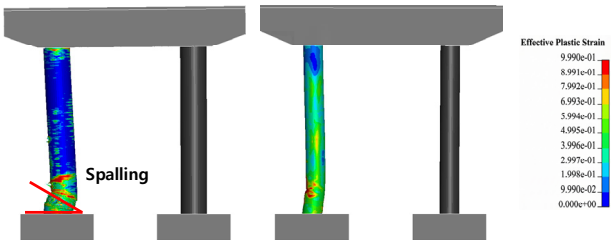
본 연구에서는 National Crash Analysis Center에서 개발한 중형 트럭 유한요소 모델을 사용하였다(Fig. 3). 해당 차량 모델은 화물 질량 분포 및 차체 강성 등 차량 충돌 거동에 영향을 미치는 주요 특성을 반영하고 있으며, 선행 연구에서도 교각 충돌 해석에 활용된 바 있다[29]-[30]. 차량 전면부의 범퍼와 엔진은 지면으로부터 각각 650 mm 및 1,000 mm 높이에 위치하며, 차량-교각 충돌 시 주요 하중은 약 650 mm–1,000 mm 높이 범위에서 전달된다.

4. 충돌 해석 결과 및 분석

4.1 RC 교각과 CFT 교각의 충돌 성능 비교

본 절에서는 차량 질량 20,000 kg 및 충돌 속도 100 km/h의 동일한 차량 충돌 조건에서 RC 교각과 등가 설계한 CFT 교각의 충돌 응답을 비교하였다. 두 교각의 충돌 성능은 최대 충격력, 최대 횡방향 변위 및 충돌 후 손상 양상을 중심으로 평가하였다.

CFT 교각의 최대 충격력은 15,065 kN으로, RC 교각의 최대 충격력 13,736 kN보다 약 10% 크게 나타났다. CFT 교각의 강관이 차량과 직접 접촉하여 충돌하중을 부담함에 따라 충돌부의 국부 접촉 강성이 증가하였고, 그 결과 충돌 초기 단계에서 상대적으로 큰 접촉 저항이 발생했기 때문으로 판단된다[9].



(a) RC pier and (b) Equivalent CFT pier

Fig. 4. Damage patterns after vehicle impact

최대 횡방향 변위는 CFT 교각에서 74.5 mm, RC 교각에서 99.0 mm로 나타났으며, CFT 교각의 최대 횡방향 변위는 RC 교각 대비 약 25 % 작다. CFT 교각에서 외부 강관과 내부 콘크리트의 합성 거동에 의해 충돌부 손상 진전이 억제되고, 충돌 중 단면 강성이 상대적으로 안정적으로 유지되었기 때문으로 판단된다.

이러한 차이는 충돌 후 손상 양상에서도 확인되며 Fig. 4에 나타나 있다. Fig. 4는 차량 충돌 후 교각에 발생한 유효소성변형률의 분포를 나타낸다. 유효소성변형률은 재료에 발생한 비가역적 소성변형의 누적 정도를 나타내며, 값이 클수록 해당 위치에서 소성변형이 크게 발생하였음을 의미한다. RC 교각은 충돌부 주변에서 피복 콘크리트의 손상과 파괴가 집중되었고, 충돌부에서 기둥 하단으로 이어지는 대각 방향으로 높은 유효소성변형률이 집중되어 취성적 전단 파괴 양상을 보였다. 충돌에너지가 콘크리트 박락과 전단 손상 등 비가역적 손상을 통해 소산되고, 유효 단면 및 국부 강성의 저하로 상대적으로 큰 횡방향 변형이 발생한 것으로 판단된다. 반면 CFT 교각은 외부 강관이 충돌하중을 직접 부담하면서 충돌부 근방에서 국부 변형이 발생하였으며, 유효소성변형률은 기둥 높이 방향으로 비교적 넓게 분포하는 양상을 보였다. 또한 강관의 국부 변형과 내부 콘크리트의 구속을 통한 합성 거동에 의해 충돌에너지가 분산·소산되면서 단면 강성이 비교적 안정적으로 유지된 것으로 판단된다.

4.2 CFT 교각 매개변수 영향 분석

본 절에서는 CFT 교각의 주요 설계 변수와 차량 충돌 조건이 충돌 시 교각의 거동 및 손상 정도에 미치는 영향을 조사하기 위해 매개변수 해석을 수행하였다. 주요 변수들은 CFT 교각의 충돌 저항 메커니즘과 연관된 다. 예를 들어 기둥 직경과 강관 두께는 단면의 휨강성 및 충돌부의 국부 변형 저항 성능에 영향을 미치며, 차량 속도는 충돌에너지 수준을 결정하여 교각의 횡방향 변형과 손상 정도에 영향을 미친다. 따라서 이러한 거동 메커니즘을 고려하여 매개변수를 선정하고, 다양한 조건에서 주요 설계 변수에 따른 CFT 교각의 손상 정도 변화를 정량적으로 분석하였다.

Table 3. Parameter values for parametric study

Parameter	Unit	Baseline value	Analysis cases
D	mm	750	600 / 650 / 700 / 750 / 800 / 850 / 900
f_y	MPa	345	295 / 320 / 345 / 370 / 395
Es	GPa	200	190 / 195 / 200 / 205 / 210
t	mm	11	5 / 7 / 9 / 11 / 13 / 15 / 17
ALR	%	10	5 / 10 / 15 / 20
f'_c	MPa	28	21 / 24.5 / 28 / 31.5 / 35
V	km/h	100	70 / 80 / 90 / 100 / 110 / 120 / 130
M_c	t	20	8 / 14 / 20 / 26 / 32
M_e	t	1.05	0.6 / 0.825 / 1.05 / 1.275 / 1.5

본 연구에서는 차량-CFT 교각 충돌 거동에 대한 매개변수 해석을 수행하기 위해 총 9개의 매개변수를 고려하였다. 각 매개변수의 적용 범위는 선행 연구에서 고려된 변수 조건을 참고하여 설정하였다[8],[30]-[33]. 강관 두께(t), 강관 항복강도(f_y), 강관 탄성계수(E_s), 콘크리트 압축강도(f'_c), 차량 질량(M_c) 및 차량 속도(V)는 선행 연구에서 제시된 변동계수를 바탕으로 표준편차를 산정하고, 평균값을 기준으로 표준편차의 2배를 가감하여 각 변수의 상·하한값을 설정하였다. 엔진 질량(M_e)과 축하중비(ALR)는 선행 연구에서 고려된 범위를 참고하여 상·하한값을 결정하였으며, 기둥 직경(D)은 실제 설계에서 적용 가능한 단면 크기를 고려하여 해석값을 설정하였다. 설정된 범위 내에서 변수 변화에 따른 응답 경향을 확인할 수 있도록 각 변수의 해석값을 선정하였다. 차량 속도, 기둥 직경 및 강관 두께의 경우 최대 횡방향 변위의 변화 폭이 상대적으로 크게 나타나, 변화 경향을 보다 세밀하게 확인하기 위해 해석값을 세분화하여 설정하였다. 해석에 적용한 변수별 해석값은 Table 3에 정리하였으며, 각 매개변수의 독립적인 영향을 평가하기 위해 하나의 변수만 변화시키고 나머지 변수는 기준값으로 고정하였다. 다만 이러한 분석은 개별 매개변수의 영향을 명확히 파악하는 데 유리한 반

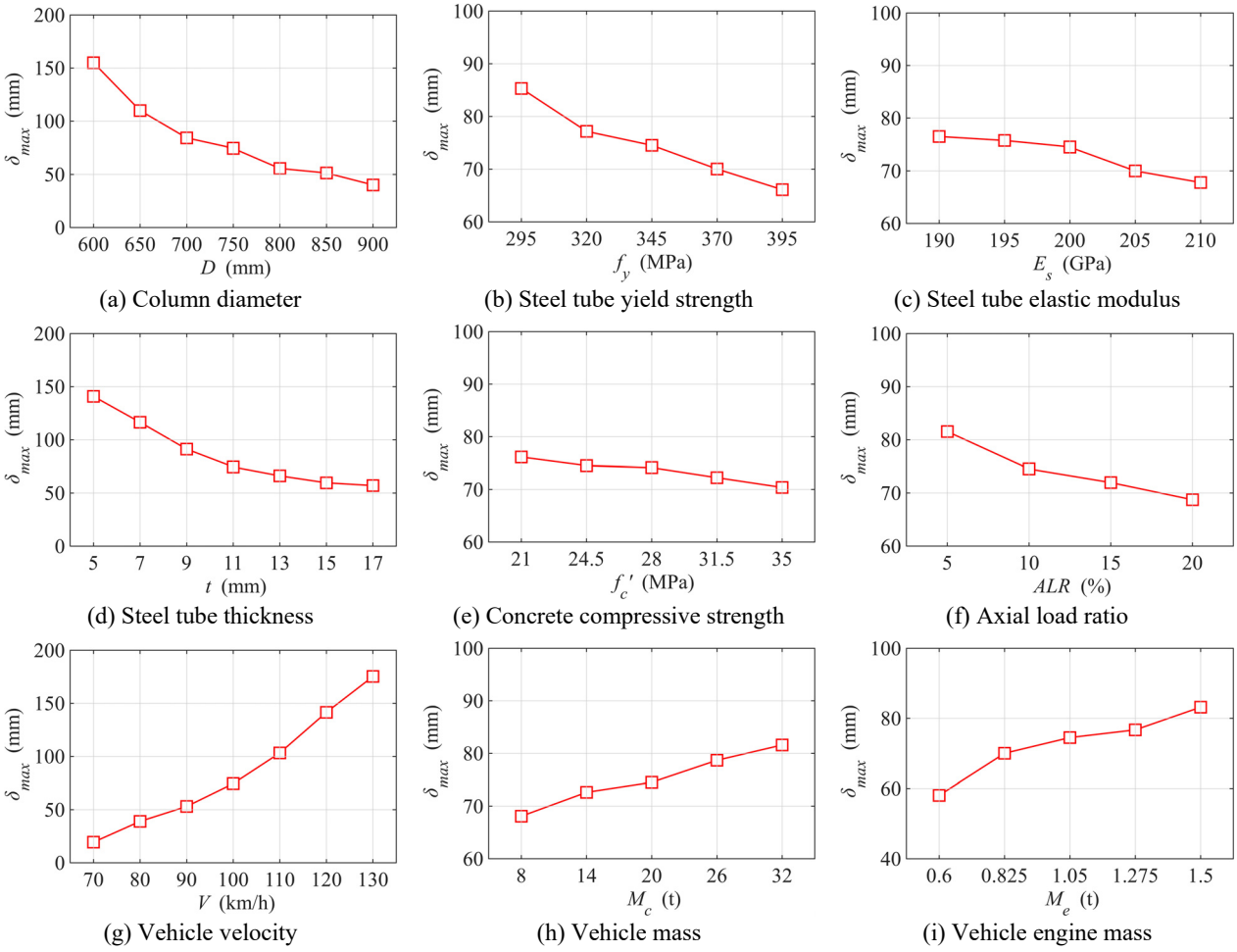
면, 실제 충돌 조건에서 발생할 수 있는 변수 간 상호작용에 따른 복합적 영향을 고려하는 데에는 한계가 있다. 최대 횡방향 변위는 차량 충돌에 따른 교각의 전역적인 변형 수준을 직접적으로 나타내며, 충돌 과정에서 명확한 정량값으로 산출할 수 있다. 구조 변수 및 충돌 조건의 변화에 따른 영향을 일관된 기준으로 비교하는 데 적합한 응답 지표로 판단하여 매개변수 해석에서는 최대 횡방향 변위를 평가 지표로 선정하였다.

4.2.1 CFT 교각 매개변수별 최대 횡방향 변위

Fig. 5는 변수 변화에 따른 CFT 교각의 최대 횡방향 변위를 나타낸 것이다. 해석 결과, 교각 관련 변수 중에서는 직경과 강관 두께가 최대 횡방향 변위에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

CFT 교각의 직경이 600 mm에서 900 mm로 증가함에 따라 최대 횡방향 변위는 약 74 % 감소하였다. 직경 증가에 의해 CFT 교각의 단면이차모멘트가 약 5배 증가하면서, 충돌하중에 대한 교각의 휨 강성이 크게 향상되었기 때문으로 판단된다. 교각의 횡방향 변위는 휨강성이 증가할수록 감소하는 경향을 보이므로, 직경 증가는 동일한 충돌 조건에서 기둥의 횡방향 변형을 효과적으로 억제하는 주요 인자로 작용한 것으로 판단된다.

강관 두께가 5 mm에서 17 mm로 증가함에 따라 최대 횡방향 변위는 약 59 % 감소하였다. 강관 두께 증가는 CFT 단면의 단면이차모멘트를 증가시켜 충돌하중에 대한 교각의 휨저항 성능을 향상시킨다. 또한 두꺼워진 강관은 충돌부의 국부 변형을 억제하고 충전 콘크리트에 대한 횡구속 효과를 증대시켜 CFT 단면의 합성거동을 강화한다. 이에 따라 강관 두께 증가는 CFT 교각의 휨강성과 횡구속 효과를 함께 증가시켜 충돌하중에 의한 횡방향 변위를 효과적으로 감소시킨 것으로 판



(a) Column diameter (b) Steel tube yield strength (c) Steel tube elastic modulus

(d) Steel tube thickness (e) Concrete compressive strength (f) Axial load ratio

(g) Vehicle velocity (h) Vehicle mass (i) Vehicle engine mass

Fig. 5. Comparison of maximum lateral displacement for different structural and vehicle parameters

단된다.

강관의 항복강도가 295 MPa에서 395 MPa로 증가함에 따라 최대 횡방향 변위는 약 23 % 감소하였다. 강관의 항복강도 증가가 충돌하중에 대한 강관의 휨 저항 성능과 국부 좌굴 저항성을 향상시켜 횡방향 변형을 억제하기 때문으로 판단된다[22].

강관의 탄성계수가 190 GPa에서 210 GPa로 증가함에 따라 CFT 교각의 최대 횡방향 변위는 약 11 % 감소하였다. 탄성계수 증가로 인해 CFT 단면의 휨강성이 증가하고, 그 결과 충돌하중에 대한 횡방향 변형 저항이 향상되었기 때문으로 판단된다.

축하중비가 5 %에서 20 %로 증가함에 따라 최대 횡방향 변위는 약 16 % 감소하였다. 본 연구에서 고려한 범위 내에서 축하중이 CFT 단면 압축 영역의 저항을 증가시켜, 충돌하중에 대한 휨저항 성능을 향상시켰기 때문으로 판단된다.

마지막으로 콘크리트의 압축강도가 21 MPa에서 35 MPa로 증가함에 따라 CFT 교각의 최대 횡방향 변위는 약 8 % 감소하였다. 콘크리트 압축강도 증가로 충전 콘크리트의 탄성계수가 증가하여 CFT 단면의 강성 향상에 기여하였기 때문으로 판단된다. 그러나 CFT 교각의 횡방향 충돌 거동은 외부 강관의 휨저항과 국부 변형 저항에 크게 좌우되므로, 콘크리트 압축강도 변화에 따른 변위 감소 효과는 상대적으로 작게 나타났다. 이러한 결과는 Lin *et al.*[22]의 CFT 기둥 충돌 해석에서 콘크리트 압축강도 증가가 최대 횡방향 변위에 제한적인 영향을 미친다는 결과와 유사하다.

4.2.2 차량 매개변수별 최대 횡방향 변위

차량 속도가 70 km/h에서 130 km/h로 증가함에 따라 최대 횡방향 변위는 약 9배 수준으로 증가하였다. 차량의 운동에너지는 속도의 제곱에 비례하므로, 속도가 증가할수록 CFT 교각에 전달되는 충돌에너지가 급격히 커진다. 그 결과 차량 속도는 본 연구에서 고려한 변수 중 최대 횡방향 변위에 가장 큰 영향을 미치는 변수로 확인되었다.

차량 질량이 8 t에서 32 t으로 증가함에 따라 최대 횡방향 변위는 약 20 % 증가하였다. 차량 질량이 커질수록 차량의 운동에너지가 증가하므로, CFT 교각에 전달되는 충돌에너지도 함께 높아진다. 이에 따라 차량 질량 증가는 CFT 교각의 횡방향 변형을 확대시키는 요인으로 작용한 것으로 판단된다.

마지막으로 엔진 질량이 0.6 t에서 1.5 t으로 증가함에 따라 최대 횡방향 변위는 약 43 % 증가하였다. 이는 엔진이 차량 전면부에 위치한 질량체이기 때문으로, 엔진 질량이 커질수록 충돌 시 교각에 전달되는 충격 효과도 함께 커지는 것으로 해석된다. 이 결과는 차량의 전체 질량뿐만 아니라 내부 질량 분포 역시 교각의 충돌 변위 응답에 중요한 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

5. 결 론

본 연구에서는 유한요소 해석 프로그램인 LS-DYNA[12]를 이용하여 철근콘크리트(Reinforced Concrete, RC) 교각과 등가 설계된 콘크리트 충전 강관(Concrete-Filled Steel Tube, CFT) 교각의 차량 충돌 응답을 비교하고, CFT 교각의 충돌 저항 성능에 영향을 미치는 주요 설계 변수와 차량 충돌 조건을 분석하였다.

(1) 구축한 CFT 기둥 수치해석 모델은 기존 횡방향 충돌 실험 결과와의 비교를 통해 타당성을 검증하였으며, 모형 트럭 충돌 시 기둥의 동적 응답과 손상 양상을 적절히 모사할 수 있음을 확인하였다. 또한 본 연구에서는 지진하중 조건에서 적용된 등가 설계 사례를 참고하여, 정적 휨강도와 전단강도가 유사한 RC 교각과 CFT 교각의 비교 모델을 구축하였다. 이를 통해 동일한 차량 충돌 조건에서 구조 형식에 따른 동적 응답 및 손상 특성 차이를 합리적으로 비교할 수 있는 해석 기반을 마련하였다.

(2) 동일한 차량 충돌 조건에서 비교한 결과, RC 교각은 충돌부 주변에서 콘크리트 박락과 손상이 집중되어 국부 강성 저하가 발생한 반면, CFT 교각은 외부 강관과 충전 콘크리트의 합성 작용으로 인해 충돌부 손상과 단면 강성 저하가 상대적으로 완화되었다. 본 해석에서 CFT 교각이 RC 교각에 비해 최대 횡방향 변위와 손상이 작게 나타났다.

(3) 매개변수 해석 결과, 기둥 관련 변수 중에서는 기둥 직경과 강관 두께가 CFT 교각의 최대 횡방향

변위에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 기둥 직경 증가에 따른 단면 휨강성 향상과 강관 두께 증가에 따른 국부 변형 저항성 및 충전 콘크리트 구속 효과 증대에 기인한 것으로 판단된다. 충돌 조건 관련 변수에서는 충돌 속도의 영향이 가장 크게 나타났으며, 본 연구에서는 차량 질량보다 엔진 질량 변화가 최대 횡방향 변위에 더 큰 영향을 미쳤다. 차량 충돌 응답에서는 단순한 차량 질량뿐만 아니라, 차량 내 질량 분포도 중요한 영향 인자로 고려될 필요가 있음을 확인하였다.

본 연구에서 설정한 차량 질량 20,000 kg 및 충돌 속도 100 km/h의 비교 조건에서는 CFT 교각이 RC 교각에 비해 차량 충돌에 따른 횡방향 변위와 손상이 작게 나타나, 상대적으로 우수한 충돌 저항 성능을 보였다. 그리고 CFT 교각의 주요 설계 변수와 차량 충돌 조건이 충돌 응답에 미치는 영향을 정량적으로 제시하였다. 이러한 결과는 향후 CFT 교각 설계 시 기둥 직경과 강관 두께 등 주요 단면 변수를 선정하고, 차량 충돌 속도와 차량 질량 등 충돌 조건에 따른 구조 응답을 비교하여 교각의 충돌 성능을 평가하는 데 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

다만 본 연구에서는 RC 교각과 CFT 교각의 비교가 단일 차량 충돌 조건에서 수행되었으므로, 다양한 충돌 조건에서 두 구조 형식의 응답을 비교할 필요가 있다. 또한 매개변수 연구 시 각 변수의 영향을 독립적으로 분석하였으므로, 실제 차량 충돌 상황에서 발생할 수 있는 변수 간 상호작용과 복합적인 손상 특성의 반영에는 한계가 있다. 향후 연구에서는 주요 설계 변수와 차량 충돌 조건의 다양한 조합을 고려한 다중 변수 해석을 수행하여, CFT 교각의 충돌 저항 성능을 보다 종합적으로 평가할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00350220).

참고문헌(References)

[1] Bruneau, M., and Marson, J. (2004) Seismic Design of Concrete-Filled Circular Steel Bridge Piers, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol.9, No.1, pp.24-34.

[2] Moon, J., Lehman, D.E., Roeder, C.W., and Lee, H.-E. (2013) Strength of Circular Concrete-Filled Tubes with and without Internal Reinforcement under Combined Loading, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.139, No.12, 04013012.

[3] Jung, D.J., Le, V.L., Lee, C.-H., and Park, M.J. (2025) Predictive Equation with Extended Applicability for Fire Resistance of Unprotected Circular CFT Columns Considering Safe Conditions, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.37, No.4, pp.171−180 (in Korean).

[4] Jung, G., Seo, H., Jin, J., Kim, D., and Lee, K. (2025) Experimental Evaluation on Seismic Performance of Side-Diaphragm Connection between CFT Column and U-shaped Composite Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.37, No.6, pp.427−436 (in Korean).

[5] de Oliveira, W.L.A., De Nardin, S., de Cresce El Debs, A.L.H., and El Debs, M.K. (2009) Influence of Concrete Strength and Length/Diameter on the Axial Capacity of CFT Columns, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.65, No.12, pp.2103−2110.

[6] Hu, B., Liu, Y.-Y., Li, Y., and Wang, H.-B. (2023) Residual Deformation-Based Performance Evaluation Method for CFST Piers Subjected to Vehicle Collision, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, Vol.37, No.2, 04023007.

[7] Heng, K., Li, R., Li, Z., and Wu, H. (2021) Dynamic Responses of Highway Bridge Subjected to Heavy Truck Impact, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.232, 111828.

[8] Li, R.W., Cao, D.S., Wu, H., and Wang, D.F. (2021) Collapse Analysis and Damage Evaluation of Typical Simply Supported Double-Pier RC Bridge under Truck Collision, *Structures*, Elsevier, Vol.33, pp.3222−3238.

[9] Han, L.-H., Hou, C.-C., Zhao, X.-L., and Rasmussen, K.J.R. (2014) Behaviour of High-Strength Concrete Filled Steel Tubes under Transverse Impact Loading, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.92, pp.25−39.

[10] Xu, N., Liu, Y., Chen, H., and Shi, Y. (2025) Data-Driven

Reliability Design of Transverse Impacted Concrete-Filled Steel Tube Columns, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.212, 113163.

[11] Demartino, C., Xu, J.J., Wu, J.G., Wang, X.Y., Ding, J.C., and Xiao, Y. (2017) A Comparison of the Impact Behavior of RC and CFT Circular Columns under Lateral Impact Loading, *Proceedings of the 2017 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM17)*, Techno-Press.

[12] Stephens, M.T., Lehman, D.E., and Roeder, C.W. (2018) Seismic Performance Modeling of Concrete-Filled Steel Tube Bridges: Tools and Case Study, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.165, pp.88−105.

[13] LSTC (2013) *LS-DYNA Keyword User's Manual*, Version 971/R7.0, Livermore Software Technology Corporation, USA.

[14] Kim, K., Kim, S., Bae, J., and Kim, S. (2025) A Study on the Evaluation of Safety Barrier Performance for the Installation of Protective Barriers on External Pipelines of Hazardous Chemicals, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.37, No.1, pp.1−9 (in Korean).

[15] Jiang, H., and Zhao, J. (2015) Calibration of the Continuous Surface Cap Model for Concrete, *Finite Elements in Analysis and Design*, Elsevier, Vol.97, pp.1−19.

[16] Murray, Y.D. (2007) *Users Manual for LS-DYNA Concrete Material Model 159*, Final Report No. FHWA-HRT-05-062, Federal Highway Administration, USA.

[17] El-Tawil, S., Severino, E., and Fonseca, P. (2005) Vehicle Collision with Bridge Piers, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol.10, No.3, pp.345−353.

[18] Han, L.-H., Yao, G.-H., and Tao, Z. (2007) Performance of Concrete-Filled Thin-Walled Steel Tubes under Pure Torsion, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.45, pp.24−36.

[19] Jiang, Y., Zhang, J., Zhang, B., and Zhang, S. (2025) Response of Steel-Tube-Confined Concrete-Filled Steel Tube Subjected to Lateral Impact Loading, *Structures*, Elsevier, Vol.78, 109389.

[20] Hu, B., and Liu, Y.-Y. (2022) Vehicular Collision Performance Evaluation of Concrete-Filled Steel Tubular Piers Designed According to Current Codes in the US, Europe, and China, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol.27, No.6, 04022038.

[21] Bölükbaş, T., and Mete, O.H. (2020) A Buckling Behavior of Elliptic Perforated Steel CHS Columns Exposed to Axial Compression Load, *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol.17, No.4, e278.

[22] Lin, S., Zhang, B., Zhang, S., Zhang, Y., and Hu, X. (2024) Dynamic Responses of Concrete-Filled Steel Tubes Impacted Horizontally by a Rigid Vehicle: Experimental Study and Numerical Modelling, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.199, 111826.

[23] Alipour, A., Shafei, B., Nelson, A., and Oppong, K. (2021) *Design and Detailing Requirements for Columns under Collision*, Final Report No. IHRB Project TR-768, Bridge Engineering Center, Iowa State University, USA.

[24] Fan, W., Xu, X., Zhang, Z., and Shao, X. (2018) Performance and Sensitivity Analysis of UHPFRC-Strengthened Bridge Columns Subjected to Vehicle Collisions, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.173, pp.251−268.

[25] Liu, Y., Yang, J., Xu, G., Wei, H., and Deng, E. (2023) Performance of UHPC Bridge Piers Subjected to Heavy Vehicle Collisions and Probability Analysis of Damage Level, *Structures*, Elsevier, Vol.47, pp.212−232.

[26] Geschwindner, L.F. (2010) Discussion of "Limit State Response of Composite Columns and Beam-Columns Part II: Application of Design Provisions for the 2005 AISC Specification," *Engineering Journal*, AISC, Vol.47, No.2, pp.131−140.

[27] ACI Committee 318 (2019) *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19)*, American Concrete Institute, USA.

[28] AISC (2022) *Specification for Structural Steel Buildings*, ANSI/AISC 360-22, American Institute of Steel Construction, USA.

[29] Kim, W.S., Lee, I., Jeong, Y., Zi, G., Kim, K., and Lee, J. (2018) Design Approach for Improving Current Concrete Median Barriers on Highways in South Korea, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, Vol.32, No.3, 04018022.

[30] Wang, G.H., Yun, J.H., and Jeon, J.-S. (2025) Explainable Machine Learning Model for Classifying Vehicle-Impact Damage of Reinforced Concrete Bridge Columns, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.343, 121292.

[31] Thomas, R.J., Steel, K., and Sorensen, A.D. (2018) Reliability Analysis of Circular Reinforced Concrete Columns Subject to Sequential Vehicular Impact and Blast Loading, *Engineering Structures*, Elsevier,

Vol.168, pp.838-851.

[32] Li, C., Liu, Y., and Li, H.-N. (2021) Fragility Assessment and Optimum Design of a Steel-Concrete Frame Structure with Hybrid Energy-Dissipated Devices under Multi-Hazards of Earthquake and Wind, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.245, 112878.

[33] Liu, K., Wang, J., Gao, S., and Xu, M. (2026) Mechanical-Data-Driven Performance Interpretation and Design of Concrete-Filled Steel Tubes under Lateral Impact, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.238, 110204.

요 약 : 본 연구에서는 LS-DYNA를 이용하여 철근콘크리트(RC) 교각과 콘크리트 충전 강관(CFT) 교각의 차량 충돌 거동 및 손상을 분석하였다. CFT 교각의 유한요소 모델은 기존 충돌 실험 결과와의 비교를 통해 검증하였다. RC 교각과 휨 및 전단 성능이 유사하도록 등가 설계된 CFT 교각을 동일한 충돌 조건에서 해석한 결과, CFT 교각은 RC 교각보다 최대 횡변위가 작고 손상이 적게 발생하였다. 또한 CFT 교각에 대한 매개변수 해석 결과, 구조 변수 중 교각 직경과 강관 두께가 횡변위에 큰 영향을 미쳤으며, 충돌 관련 변수 중에서는 충돌 속도가 가장 지배적인 것으로 나타났다.

핵심용어 : 콘크리트 충전 강관 교량 교각, 차량 충돌, 충돌 후 손상, 유한요소해석, 횡변위