

## 내부 채움 강관말뚝의 거동 특성 분석

### An Analysis of Behavior Characteristics of Interior-Filled Steel Pipe Piles

○김민선\*      김동관\*\*      김호수\*\*  
Kim, Min-Seon      Kim, Dong-Kwan      Kim, Ho-Soo

#### Abstract

In order to solve the uneconomical problem of existing steel pipe piles by improving the cross-sectional performance of steel pipe piles and reducing the required cross-sectional size of steel pipes, an internally filled steel pipe pile was proposed by filling circulating resources inside the steel pipe and fastening the pile cap. A total of 7 test specimens were manufactured using fillers (Sand, Fly Ash), connectors (Rubber, MC Nylon), and pile caps (Screw, Bolt) as experimental variables, and a steel pipe pile compression experiment was conducted. As a result of the compression test, when comparing the empty steel pipe specimen and the four types of specimens with internal fillers, connectors, and bolted pile caps, it was found that the compressive strength was slightly higher by a small difference. Additionally, when checking the external deformation, the specimen filled with filler showed less deformation than the hollow steel pipe. Therefore, it was found that the filler, connector, and pile cap selected as experimental variables had an effect on improving the compressive strength of the steel pipe pile.

키워드 : 강관말뚝, 내부 채움재, 압축성능

Keywords : Steel Pipe, Interior Filling, Compression Performance

#### 1. 서론

세계적으로 각종 산업에 대한 환경 문제가 대두되고 있다. 2021년 글로벌 탄소 중립 선언에 따라 정부는 2050년까지 산업 부분의 탄소 배출량의 90% 이상 감소시키는 계획을 발표하면서 탄소 배출 감소에 대한 문제가 크게 강조되고 있다. 산업 부문에서 건설 산업은 시멘트 사업을 중심으로 2018년 기준 3,600만 톤의 양으로 대부분의 탄소 배출량을 차지하고 있다.

환경 문제에 대한 심각성이 증가함에 따라 건설 산업 자체의 환경적 영향을 고려하고 있다. 특히, 건설 현장에서 사용되는 기초 재료와 기술이 탄소 배출과 환경 오염에 미치는 영향이 크게 검토되고 있다.

기초 구조물 중에서 주로 쓰이는 강관말뚝은 탄성이 크고 연성이 우수하여 깊은 기초의 재료로 활용되며, 상대적으로 경량화되어 있어 운반 및 시공이 용이하다. 또한, 수평하중에 대한 저항력이 뛰어나 대형 구조물에 주로 적용된다.

한편, PHC(고강도 프리스트레스트 콘크리트) 말뚝은 PC 말뚝의 성능을 개선하여 압축강도와 휨모멘트에 대한 저항성을 향

상시킨 말뚝이다. 일반적인 강관말뚝과 비교하였을 때, 수직력은 대등하지만 수평력은 1/5 ~ 1/6 수준으로 수평력 확보를 위한 직경 증가의 단점이 있으며, 두부 정리 시 폐기물이 발생하고 기초 상판과 연결 부분의 취약성으로 내진 설계 시 적용에 어려움이 있다. 이에 따라 현장에서는 대부분 강관말뚝을 사용하고 있다. 그러나 강관말뚝은 고가의 재료비와 원자재 수입 의존성으로 인해 공사비 증가로 이어져 대체 가능한 말뚝에 대한 관심이 증가하고 있다. 국내에서는 대안으로 강관말뚝과 PHC 말뚝을 결합한 복합말뚝, FRP-콘크리트 합성말뚝 등에 대한 연구가 이루어졌지만, 여전히 경제성에 대해 불리한 실정이다.

따라서, 본 연구는 강관말뚝과 PHC 말뚝을 상호 보완하기 위해 속이 비어있는 강관말뚝 내부에 건설 폐기물, 생활 폐기물 등의 순환 자원을 채워 넣어 단면 성능을 개선하고 요구되는 강관의 단면 크기를 감소시켜 기존 강관 말뚝의 비경제적인 문제를 해결하고, 채움재 종류에 따른 말뚝의 거동 특성 분석을 통해 말뚝에 대한 내진 설계의 중요성을 강조하고 경제성을 개선한 말뚝을 개발하고자 한다.

#### 2. 내부 채움 강관말뚝 압축 실험

##### 2.1 실험체 설계

실험 변수로는 단면 성능을 향상시키고 요구되는 강관의 단면 크기 감소를 위한 채움재, 내부 채움재로 하중을 전달하기 위한 연결재와 강관 내부에 일정한 압력을 가하기

\* 청주대학교 건축공학과, 석사과정

\*\* 청주대학교 건축공학과 교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Cheongju University, rlaalstjs8972@gmail.com)

이 연구는 2024년도 청주대학교 연구장학 지원에 의한 결과의 일부임.

위해 파일캡을 고려하였다. 채움재는 기준이 되는 모래와 화력 발전 폐기물인 플라이애시, 연결재는 고무와 MC 나일론 소재로 선정하였으며, 파일캡은 나사 파일캡과 볼트 파일캡을 고려하여 실험체를 제작하였다. 내부 채움 강관 말뚝의 거동 특성 분석을 위해 기존 강관파일(이하, SP 1)과 채움재, 연결재, 파일캡을 체결시킨 강관파일(이하, SP 2~7)로 총 7개의 압축 실험용 실험체를 제작하였으며, 표 1과 그림 1에 나타내었다.

압축강도 실험체는 외경의 지름 267.4mm, 두께가 12.7t, 길이 1,200mm의 원형 강관을 이용하여 제작되었다. 연결재의 하중 전달 여부와 채움재에 따른 내부 채움 강관말뚝의 압축 성능, 기존 강관과의 차이를 비교하기 위하여 다음과

같이 구분하였다.

SP 1의 경우, 실험체 양단에 가로 600mm, 세로 600mm, 두께 20mm의 사각형 강판을 부착하였고, SP 2~7의 경우, 실험체 상단에 파일캡을 하단에는 SP 1에 부착한 사각형 강판을 부착하여 하중을 재하 할 수 있도록 하였다. SP 2, 3은 모래와 플라이애시를 각각 채워 넣어 MC 나일론 소재의 연결재와 나사 파일캡을 체결하였고, SP 4는 모래와 고무 소재의 연결재, SP 5는 모래, MC 나일론 연결재 그리고 SP 6, 7의 경우 앞의 두 실험체 조건에서 채움재를 플라이애시로 하여 채워 넣은 후 4개의 실험체에 볼트 파일캡을 체결하였다.

표 1. 실험체의 특성

실험체	Steel Pipe	BasePlate	채움재	연결재	파일캡
SP 1	Φ267.4 × 12.7 1,200mm	상·하단	X	X	X
SP 2		하단	모래	MC 나일론	나사 파일캡
SP 3			플라이애시	MC 나일론	나사 파일캡
SP 4			모래	고무	볼트 파일캡
SP 5			모래	MC 나일론	볼트 파일캡
SP 6			플라이애시	고무	볼트 파일캡
SP 7			플라이애시	MC 나일론	볼트 파일캡

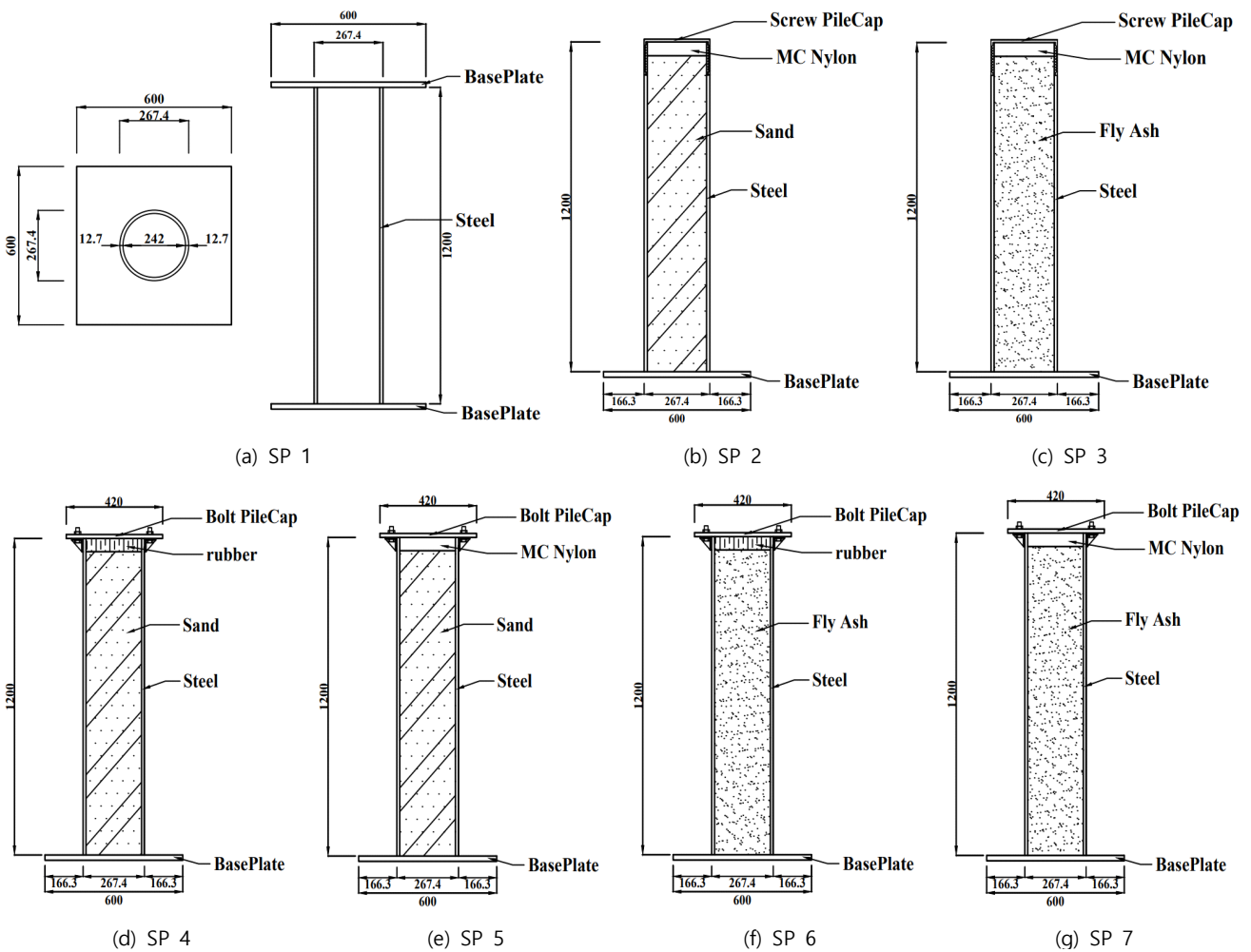


그림 1. 압축실험용 실험체

## 2.2 실험 방법

강관 내부에 채움재와 연결재를 넣어 파일캡을 체결한 말뚝의 압축 성능을 확인하기 위하여 20,000kN 용량의 Dynamic UTM(Universal Testing Machine)을 이용하여 최대 하중을 확인하고 최대하중의 85%까지 가하여 실험을 실시하였다. 압축하중 재하에 따른 강관 부재의 변형 및 변형률 변화를 확인하기 위하여 변형률 게이지를 부착하였다. 변형률 게이지는 실험체 상·하단 기준 50mm 이격 후 실험체를 상·중·하로 나누어 실험체에 실험체 변위 기입한 위치를 기준으로 하여 전·후면은 수직 방향으로 양 측면은 수평 방향으로 하여 설치하였다. 실험 시 UTM을 통해 전달받은 실험체에 가해진 하중과 변위를 데이터 로그에 저장하였고, 변형률 게이지를 이용해 실험체에 발생한 변형률을 실시간으로 데이터 로그에 저장하였다. 그림 2는 내부 채움 강관말뚝 실험체의 압축실험 모습이다.



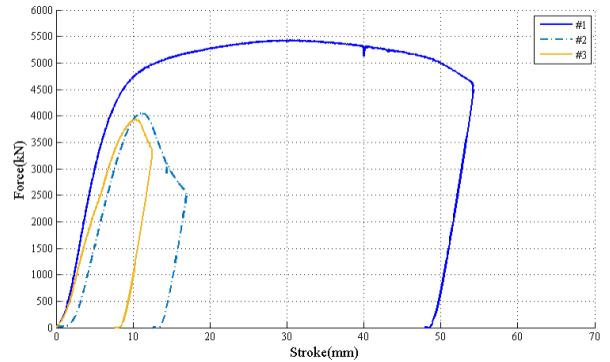
그림 2. 내부채움 강관말뚝 압축실험

## 3. 결과 분석

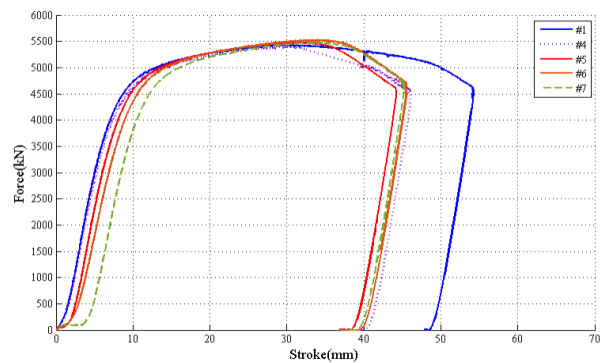
### 3.1 하중 - 변위 관계

그림 3은 내부 채움 강관말뚝 실험체의 압축 실험 결과로 나타난 하중 - 변위 관계이다. 그림 3-(b)를 보면, 기존 강관 파일 실험체와 비교하였을 때, 볼트 파일캡을 체결한 실험체 중 SP 5~7 실험체는 최대 압축 하중이 증가한 것을 확인할 수 있다.

내부 채움 강관말뚝 압축 실험의 실험 결과를 표 2에 나타내었다. 표 2와 같이 내부를 채우지 않고 양단 Base Plate를 부착한 강관 실험체(SP 1)의 경우 최대 압축강도 5425.4kN(변형 30.48mm), 모래와 MC 나일론을 넣어 나사 파일캡을 체결한 강관 실험체(SP 2)의 압축강도 4050.4kN



(a) 나사 파일캡 강관



(b) 볼트 파일캡 강관

그림 3. 압축 하중 - 변위 관계

(변형 10.99mm), 플라이에시와 MC 나일론에 나사 파일캡을 체결한 강관 실험체(SP 3)의 압축강도 3929.1kN(변형 10.3mm), 모래, 고무, 볼트 파일캡 체결한 실험체(SP 4)의 압축강도 5395.8kN(변형 30.64mm), 모래, MC 나일론, 볼트 파일캡을 체결한 실험체(SP 5)의 압축강도 5473.6kN(변형 31.21mm), 플라이에시, 고무에 볼트 파일캡을 체결한 실험체(SP 6)의 압축강도 5528.1kN(변형 33.24mm), 플라이에시, MC 나일론, 볼트 파일캡을 체결한 실험체(SP 7)의 압축강도 5470.8kN(변형 33.67mm)로 나타났다.

볼트 파일캡을 체결한 SP 4~7의 경우 채움재, 연결재에 따라 약간의 차이를 보이지만, 전체적인 거동은 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 그림 3과 표 2를 통해 SP 1과 비교하였을 때 볼트 파일캡을 체결한 실험체(SP 4~7)는 근소하지만 비교적 더 큰 강도를 갖는 것을 알 수 있다.

그림 4는 상·하단 Base Plate를 부착한 빈 강관말뚝 실험체(SP 1)과 볼트 파일캡 체결 실험체 4개 중 플라이에시, 고무를 채운 실험체(SP 6)의 압축 실험 후 실험체 변형 모습을 나타낸 것이다. 그림 4를 보면 SP 1의 경우, 하중이 가해지면서 상단부와 하단부에 부풀어 오르는 변형이 발생하였고, 볼트 파일캡을 체결한 SP 6의 경우 하단부에만 SP 1과 같이 부풀어 오르는 변형이 발생하였다. 이를 통해 내부 채움재와 연결재가 강관 내부에서 하중을 나누어 받으면서 강관의 변형을 어느 정도 방지해주는 것으로 나타났다.

표 2. 압축 실험 결과

구분	변위 (mm)	최대하중 (kN)	최대변위 (mm)	하중 (kN)
SP 1	30.48	5425.4	54.18	4508.8
SP 2	10.99	4050.4	16.90	2512.6
SP 3	10.30	3929.1	12.44	3328.8
SP 4	30.64	5395.8	46.10	4465.8
SP 5	31.21	5473.6	44.19	4554.8
SP 6	33.24	5528.1	45.53	4567.8
SP 7	33.67	5470.8	45.17	4628.8



(a) SP 1 실험 후



(b) SP 6 실험 후

그림 4. 실험체 변형

#### 4. 결론

본 연구는 기존 강관말뚝의 경제성과 PHC 말뚝의 내진 성능 등을 보완하고자 강관말뚝을 순환 자원과 파일캡을 적용한 후 압축 실험을 실시하였다. 채움재와 연결재, 파일캡

종류로 구분하여 내부 채움 강관말뚝의 압축 성능을 비교 분석하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 직경 267.4mm, 두께 12.7t, 높이 1200mm 강관에 실험 변수를 채움재(모래, 플라이애시), 연결재(고무, MC 나일론), 파일캡 (나사 파일캡, 볼트 파일캡)으로 하여 내부 채움 강관말뚝을 제작하였다.

2) 내부 채움 강관말뚝의 압축강도를 측정하기 위해 SP 1, SP 2 등 7 종류의 실험체에 대하여 실험을 진행하였다. 압축실험 결과 나사 파일캡을 체결한 실험체의 압축강도는 기댓값에 미치지 못했지만, 볼트 파일캡을 체결한 실험체의 경우 근소한 값의 차이더라도 기존 강관에 비해 높은 압축강도 값이 나타났다. 압축실험 결과 강관말뚝의 외적 변형으로는 하중을 받으면서 상·하단부에 변형이 생긴 기존 강관 실험체와 하단부에만 변형이 발생한 볼트 파일캡 체결한 실험체를 확인할 수 있다.

3) 압축실험 결과 나타난 7개의 실험체의 압축 강도와 변형 값을 통해 실험 변수에 따라 작은 값의 차이임에도 압축강도에 영향이 미치는 것을 확인했으나, 이 연구에서 얻은 결과보다 채움재, 연결재, 파일캡을 통한 높은 효과를 보기 위해 다양한 조건의 실험 변수가 요구되며, 이에 대해서는 후속 연구를 통해 수행할 계획이다.

#### 참고문헌

1. 윤일로, 홍기남, “강관말뚝 기초 두부 연결부의 압축 거동에 관한 연구”, 한국산업융합학회 논문집, Vol. 9, No. 3, 2006
2. 대한건축학회, “건축물 기초구조 설계기준(KDS 41 19 00)”, 2022
3. 정성규, “강관말뚝 설계지력 산정의 문제점 분석 및 고찰”, 석사학위논문, 서울시립대학교, 2010
4. 한정환, 방진욱, 이승수, 김윤용, “내부충전 콘크리트와 전단철근을 이용한 중공PCH말뚝의 전단보강 효과”, 한국콘크리트학회 논문집, 24권, 1호, 2012, PP. 71~78
5. 안진희, 남동균, 이원홍, 허정원, 김인태, “원형 강관의 국부 부식손상 수준 및 손상형태에 따른 압축강도 성능평가”, 한국강구조학회 논문집, 28권, 4호, 2016년 8월, pp 213~222
6. 정성규, “강관말뚝 설계지력 산정의 문제점 분석 및 고찰”, 석사학위논문, 서울시립대학교, 2010