20TBIP-C144438-03

프리스트레스가 도입된 콘크리트 충전 강관말뚝을 이용한 복합말뚝 설계 시공기술 개발 최종보고서

2020

국토교통부 국토교통과학기술진흥원

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )발간등록번호()

국토교통기술사업화지원사업 제3차 연도 최종보고서

R&D / 20TBIP-C144438-03

프리스트레스가 도입된 콘크리트 충전 강관말뚝을 이용한 복합말뚝 설계 시공기술 개발 최종보고서

2020.12.31.

주관연구기관 / (주)파일웍스

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'프리스트레스가 도입된 콘크리트 충전 강관말뚝을 사용한 복합말뚝 설계 시공기술 개발'(연구개발 기간 : 2018.04. ~ 2020.12.) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2020.12.31.

주관연구기관명 : (주)파일웍스 (대표자) 백 규 호 (인)
공동연구기관명 : (대표자) (인)
참여기관명 : (대표자) (인)

주관연구기관책임자: (주)파일웍스 대표 백규호
공동연구기관책임자:
참여기관책임자:

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>20TBIP-C144438-03</td><td>해당 단계 연구 기간</td><td>2020.01.01.~ 2020.12.31</td><td>단계구분</td><td>3/3</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">국토교통기술사업화지원사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">프리스트레스가 도입된 콘크리트 충전 강관말뚝을 이용한
복합말뚝 설계 시공기술 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">백규호</td><td>해당단계
참여연구원 수</td><td>총: 10명
내부: 8명
외부: 2명</td><td>해당단계
연구비</td><td>정부: 120,000천원
민간: 80,000천원
정부외: 천원
상대국: 천원
계: 200,000천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간
참여연구원 수</td><td>총: 10명
내부: 8명
외부: 2명</td><td>총 연구비</td><td>정부: 402,000천원
민간: 268,000천원
정부외: 천원
상대국: 천원
계: 670,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및 소속 부서명</td><td colspan="2">(주)파일웍스 기술개발부</td><td colspan="2">참여기업명</td><td></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="2">상대국명:</td><td colspan="2">상대국 연구기관명:</td><td></td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="2">연구기관명: 전주대학교</td><td colspan="2">연구책임자: 정흥진</td><td></td></tr>
</table>

※ 국내・외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반등급(사업화 기술이 상용화되어 건설현장에 적용되는 단계이므로 보완의 필요성이 없음)

9대 성과 등록・기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설・장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록・기탁 번호	3편	1건	3건			1개					

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설・장비 현황

구입기관	연구시설・장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약 : 얇은 두께의 강관 내부에 프리스트레스가 도입된 PHC말뚝이 합성된 상부 PCFT말뚝과 하부 PHC말뚝이 연결된 PCFT 복합말뚝이 개발됨. PCFT 복합말뚝의 실용화를 위해 PCFT말뚝에 대한 P-M 상관도를 결정하고, 이를 반영한 PCFT 복합말뚝에 대한 구조설계 프로그램을 개발함	보고서 면수 75쪽

요약문

연구의 목적 및 내용	본 연구는 '프리스트레스가 도입된 중공형 콘크리트 충전 강관말뚝을 사용한 복합말뚝 기술의 실용화'라는 최종 목표를 달성하기 위해 다음의 총 6개 세부 연구내용을 수행하였음. • PCFT 복합말뚝의 현장 시험시공을 통한 구조성능 및 경제성 검토 • PCFT말뚝의 대량 생산을 위한 최적의 생산시스템 구축 • PCFT 복합말뚝의 구조성능과 시공성 향상을 위한 요소기술 개발 • PCFT 복합말뚝의 최적 설계를 위한 PCFT말뚝의 강도특성에 대한 설계기준 구축 • PCFT 복합말뚝의 효율적인 설계를 위한 구조계산 프로그램 개발 • 기술 검증과 기술영업 촉진을 위한 각종 기술인증 신청
연구개발성과	• 현장 수평재하시험을 통해 PCFT 복합말뚝은 동일 직경의 HCP에 비해 수평지지력이 60.5% 증가하였고, 동일 하중 작용 시 발생한 말뚝의 수평변위는 약 50% 감소함으로써 HCP를 PCFT 복합말뚝으로 대체할 경우 말뚝 시공수량 감소가 가능하였음. • 트레미관 이용한 압력송출방식과 컨베이어밸트 이송방식으로 강관에 콘크리트 투입성을 비교한 결과 작업성이나 투입효율 측면에서 컨베이어밸트 방식이 더 우수하였고, 강관 상부에 압축성 밴드를 부착함으로써 몰드의 원심성형 시 강관과 몰드 사이의 빈 공간으로 시멘트밀크가 유출되어 콘크리트의 재료분리가 발생하는 것을 방지하였음. • PCFT 복합말뚝의 시공성과 구조안정성 향상을 위해 수평핀 결합방식의 말뚝 이음방법을 개발하였고, 직경 조절이 가능한 보강밴드를 이용한 강결합 방식의 두부보강재를 개발하여 PCFT 복합말뚝의 실용성을 높였음. • 강관에 의한 콘크리트의 구속효과를 고려해서 PCFT말뚝의 강도특성을 나타낸 P-M 상관도를 제안하였고, 이러한 P-M 상관도를 이용해서 PCFT 복합말뚝의 구조해석을 손쉽게 수행항 수 있는 설계프로그램을 엑셀 기반으로 개발하였음. • 기술에 대한 객관적 검증과 실용성 제고를 위해 PCFT 복합말뚝 기술을 한국도로공사 기술마켓에 등록하였고, 국토부 건설신기술로 지정받기 위해 신청서 제출 예정임.
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	• PCFT 복합말뚝은 기존 말뚝에 비해 구조성능이 우수해서 수평지지력이 증대되므로 말뚝 시공수량을 줄여 기초 공사비를 절감하고 공사기간을 단축시킬 수 있으며, 현장시공 공정을 최소화하여 품질향상에도 기여할 수 있음 • PCFT 복합말뚝의 적용으로 지진 발생 시 구조물의 수평변위를 억제하고 말뚝기초의 취성파괴를 방지함으로써 구조물의 급격한 붕괴를 방지할 수 있음. • 수평핀 결합 이음방식의 개발로 현장에서 급격한 지지층 심도 변화를 고려한 말뚝 길이 조절이 용이하고, 기후조건과 무관하게 일정한 품질로 이음시공을 할 수 있어 말뚝의 시공성과 품질개선에 기여할 수 있음 • PCFT 복합말뚝의 적용에 따른 말뚝 시공수량 감소로 강관말뚝과 PHC말뚝의 주원료인 철강재와 시멘트의 사용량을 줄일 수 있어 철강재 및 시멘트 생산과정에서 발생하는 온실가스를 감축해 지구온난화를 억제하는데 기여할 수 있음.

국문핵심어 (5개 이내)	PCFT말뚝	PCFT 복합말뚝	최적 생산방법	P-M 상관도	설계 프로그램
영문핵심어 (5개 이내)	PCFT pile	PCFT hybrid composite pile	Optimal production method	P-M diagram	Design program

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1

1.1 사업화 대상기술의 개요 ····· 1

1.2 사업화 기술의 우수성과 독창성 ····· 4

1.3 사업화 대상기술의 제품화 ····· 11

1.4 현재 기술수준 및 추가 연구개발 필요성 ····· 12

2. 연구수행내용 및 성과 ····· 19

2.1 연구개발 추진 전략 및 방법 ····· 19

2.2 연구개발 내용 및 결과 ····· 20

2.3 연구개발 성과 ····· 65

2.4 연구 결과 ····· 68

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 70

3.1 목표 ····· 70

3.2 목표 달성여부 ····· 70

3.3 목표 미달성 시 원인 및 차후대책 ····· 72

4. 연구개발성과의 활용 계획 등 ····· 74

붙임. 참고 문헌 ····· 75

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

가. 사업화 대상기술의 개요

(1) 기술개발 배경

최근 많은 건설사들이 원가 절감을 통한 재무구조 개선과 국내외 공사수주를 위한 원가경쟁력 강화를 위해 모든 건설공종에 대해 구조성능을 극대화하고 시공성을 향상시켜 공사비를 절감하고 공기를 단축할 수 있는 신기술 개발에 집중하고 있다.

구조물에 작용하는 하중과 자중을 지지층에 전달해서 구조물을 안정하게 지지하는 말뚝 기초는 재질에 따라 콘크리트로 제작된 PHC말뚝과 강재로 제작된 강관말뚝으로 구분된다. PHC말뚝은 휨강도에 비해 압축강도가 우수해서 수평하중이 작고 연직하중이 크게 작용하는 건축구조물에 주로 사용되는 반면, 강관말뚝은 압축강도 뿐 아니라 휨강도도 우수해서 수평하중이 크게 작용하는 교대와 옹벽 등과 같은 토목구조물과 지진 시 수평하중을 크게 받을 수 있는 플랜트 구조물에 많이 사용되어 왔다. 그러나 강관말뚝은 동일 직경의 PHC말뚝보다 가격이 3~4배 이상 비싸고 시공과정에서 동일 직경의 말뚝과 연결하거나 말뚝과 구조물의 바닥콘크리트를 연결하기 위한 공사비도 비싸서 기초 공사비 상승의 주원인으로 지목되어 왔다. 그 결과 많은 연구자들은 말뚝 기초 공사비의 절감을 위해 PHC말뚝보다 휨강도가 향상되고 강관말뚝보다 재료비가 절감되는 말뚝 재료 또는 기술을 개발하기 위해 관련 연구를 계속해 왔으나 현재까지 말뚝기초의 구조 안전성과 시공성, 경제성을 겸비한 기술은 개발되지 않고 있다.

(2) 사업화 기술의 개요

사업화 기술인 선행압축력이 도입된 콘크리트 충전 강관(PCFT, Prestressed Concrete Filled Steel tube)말뚝은 얇은 두께의 강관 내부에 콘크리트를 중공형으로 충전해서 말뚝의 휨강성을 증대시킨 것으로, 복합말뚝(HCP, Hybrid Composite Pile)의 상부에 사용되는 강관말뚝을 대체함으로써 강관말뚝을 사용할 때보다 재료비는 낮추고 휨강성과 시공성은 높여서 기초 공사비를 절감시키기 위한 것이다. 즉, PHC말뚝 상부에 결합되어 복합말뚝을 형성할 PCFT말뚝은 그림 1-1과 같이 두께가 5~6mm인 강관 내부에 긴장력이 도입된 PC강봉을 설치하고 압축강도가 80MPa 이상인 고강도 콘크리트를 타설한후 3~4g의 원심성형 통해 강관 내부에 선행압축력이 도입된 중공형의 PHC말뚝이 합성된 구조로, 기존 강관말뚝에 비해 강재 사용량을 50% 이하로 줄여서 재료비를 절감하고 강관의 단면적 감소에 따른 강도 저하를 강관 내부에 충전된 콘크리

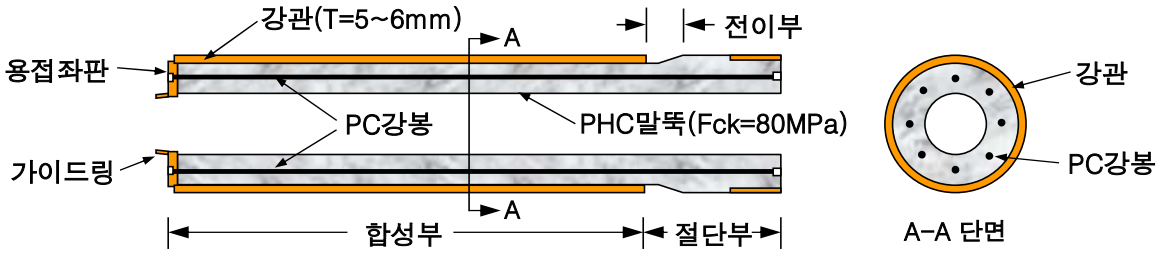


그림 1-1. PCFT말뚝의 개념도

트에 의해 보강함으로써 강관말뚝 대비 압축 및 휨강도가 향상되는 특징을 갖고 있다.

특히 PCFT말뚝은 그림 1-2와 같이 강관 내부에 PHC말뚝이 결합된 합성부와 강관이 없이 PHC말뚝으로만 구성되는 절단부로 구성된다. 그리고 PCFT말뚝의 하단에는 그림 1-3과 같이 복합말뚝으로 사용할 때 하부 PHC말뚝의 상단부와 연결하기 위한 용접 이음판과 상·하부말뚝의 중심축을 손쉽게 맞추기 위한 가이드링이 결합되어 있고, 상부에는 말뚝을 매입공법으로 시공했을 때 지상에 노출되어 경타에 사용된 후 구조물의 기초콘크리트와 연결하기 위해 절단·제거될 절단부(0.5~1m)가 위치하고 있다.



그림 1-2. PCFT말뚝의 구성

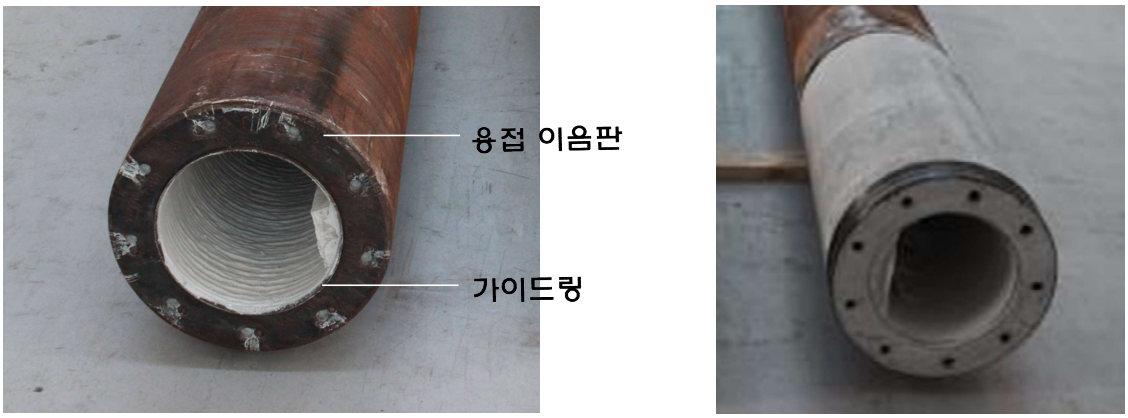


그림 1-3. PCFT말뚝의 하단(용접이음판 및 가이드링)과 상단의 모습

기존 연구결과에 따르면 콘크리트가 충전된 강관부재에 압축 및 휨하중을 작용시키면 외부를 감싸는 강관이 콘크리트의 파괴에 따른 부피 팽창을 억제하는 구속효과(confining effect)가 발생해서 콘크리트의 압축강도가 커지게 되고, 그로 인해 콘크리트 충전 강관부재의 압축강도와 휨강도는 강관과 콘크리트 부재 각각의 압축 및 휨강도를 단순히 합산한 것보다 훨씬 커지는 것으로 알려져 있다. 또한 말뚝 상단에 수평하중이 작용하면 지표면으로부터 일정 깊이까지만 말뚝에 수평하중이 전달되어 큰 크기의 휨하중(bending moment)이 작용하고 일정 깊이 이하에 위치한 말뚝에는 수평하중은 거의 전달되지 않고 주로 연직하중이 전달되는 특징이 있다.

따라서 두께가 얇은 강관을 사용한 PCFT말뚝은 강관말뚝 대비 강재 사용량을 50% 이하로 줄이면서 압축 및 휨강도는 강관말뚝보다 향상시킴으로써 수평하중이 작용하는 구조물의 기초에 사용할 경우 기초공사비 절감은 물론 말뚝 기초의 구조적 안정성 증대에도 효과적일 수 있다. 또한 그림 1-4와 같이 수평하중을 받는 구조물의 기초에 수평하중이 전달되는 깊이까지는 휨강도가 대폭 향상된 PCFT말뚝을 사용하고 수평하중이 거의 전달되지 않는 일정 깊이 아래에는 휨강도는 작지만 압축강도가 크고 가격이 저렴한 PHC말뚝을 사용한 PCFT 복합말뚝을 사용하면 말뚝의 연직 및 수평지지력이 향상되어 동일 하중조건 하에서도 말뚝의 시공 수량을 감소시킬 수 있게 됨으로써 기초 공사비를 절감하고 공사기간을 단축해서 공사비를 최소화할 수 있다.

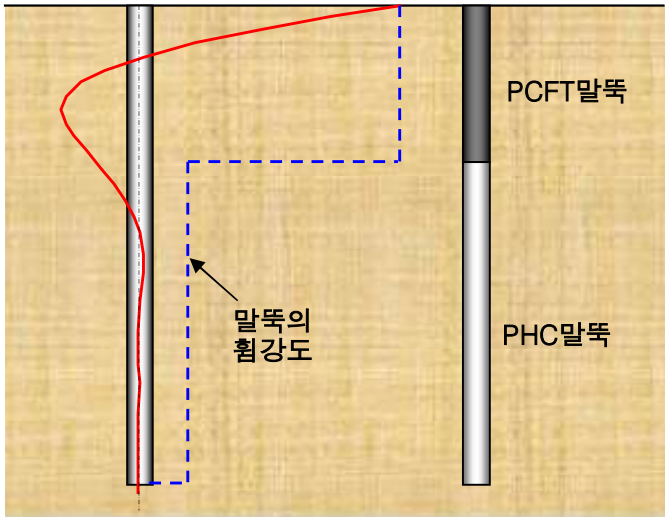


그림 1-4. 수평하중을 받는 말뚝 내 휨하중 분포와 최적 말뚝 조합

나. 사업화 기술의 우수성과 독창성

(1) 기술의 우수성

수평하중을 받는 말뚝기초가 구조적으로 안전하기 위해서는 무엇보다 수평하중에 의한 휨모멘트와 전단력에 대해 말뚝의 저항능력이 커야 한다. 그래서 PCFT말뚝을 포함해서 강관말뚝과 PHC말뚝의 휨모멘트와 전단력에 대한 저항능력, 즉 휨강도와 전단강도를 비교하기 위해 직경이 450mm와 500mm인 3종류의 말뚝에 대해 휨강도시험과 전단강도시험을 실시하였다.

말뚝에 대한 휨강도시험은 직경이 각각 450mm와 500mm이고 길이가 7m인 PCFT말뚝(합성부 6.0m, 절단부 1.0m)과 두께가 12mm인 강관말뚝 및 PHC말뚝에 대해 수행하였고, 시험은 그림 1-5에 보이듯이 KS F 4306에 따라 진행되었다. 그리고 합성된 PHC말뚝에 대한 강관의 구속효과에 의한 PCFT말뚝의 휨강도 증대효과를 조사하기 위해서 PCFT말뚝을 구성하는 두께 6mm의 강관에 대해서도 휨강도시험을 수행하였고, 강관과 내부 합성 PHC말뚝 사이의 부착력이 PCFT말뚝의 휨강도에 미치는 영향을 규명하기 위해 강관 내벽에 전단연결재를 설치한 것과 설치하지 않은 말뚝에 대해서도 휨강도시험을 수행하였다. 또한 PHC말뚝 중공부에 철근망을 설치하고 콘크리트를 충전해서 휨강도를 향상시킨 ICP말뚝과 PCFT말뚝의 휨강도 비교를 위해 방진욱 등(2013)이 논문에서 발표한 직경 450mm의 ICP말뚝에 대한 휨강도시험 결과를 PCFT말뚝의 휨강도 시험결과와 비교하였다. 참고로 휨강도시험을 통해 시험말뚝에 가해지는 휨모멘트는 KS F 4306에 제시된 식 (1-1)을 사용해서 산정하였다.

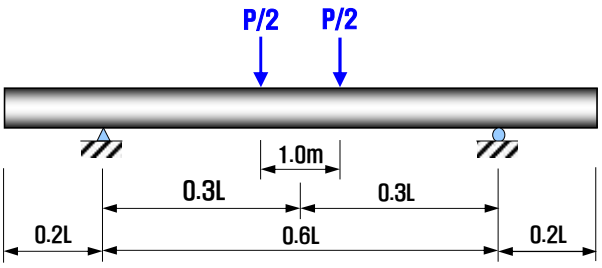




그림 1-5. 말뚝의 휨강도시험 방법 및 전경

$$M(kN \cdot m) = \frac{wL^2}{40} + \frac{P}{4}\left(\frac{3}{5}L - 1\right) \qquad (1\text{-}1)$$

여기서 w=말뚝의 단위 길이당 중량(직경 450mm인 PHC말뚝은 2.13kN/m, 두께 12mm 강관

말뚝은 1.27kN/m, PCFT말뚝은 2.56kN/m, ICP말뚝은 3.83kN/m이고, 직경이 500mm인 PHC 말뚝은 2.69kN/m, 두께 12mm 강관말뚝은 1.41kN/m, PCFT말뚝은 3.17kN/m)이고, L=시험말뚝의 길이, P=시험말뚝 중앙부에 가해진 하중을 나타낸다.

그림 1-6은 직경이 450mm와 500mm인 PCFT말뚝과 강관말뚝, PHC말뚝의 휨모멘트-중앙부 처짐량 곡선을 보인 것이고, 표 1-1은 휨강도시험에 사용된 말뚝의 특징과 말뚝 종류별 최대 휨모멘트, 즉 휨강도를 나타낸 것이다. 그림과 표에서 보듯이 PCFT말뚝은 동일 직경의 PHC말뚝 및 ICP말뚝 대비 각각 4.0~5.4배와 2.91배, 그리고 두께가 12mm인 강관말뚝 대비 1.19

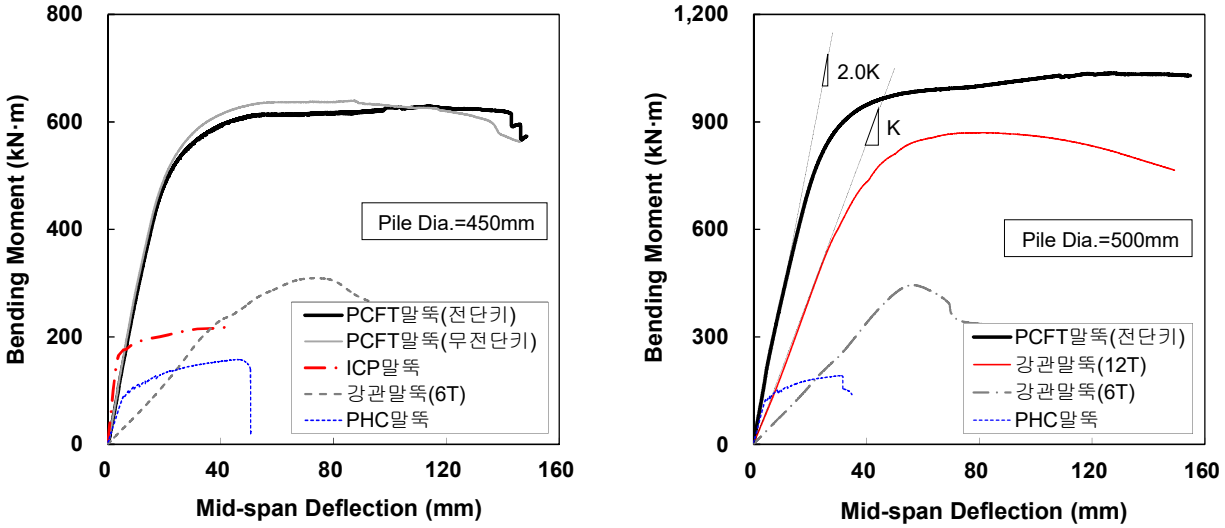


그림 1-6. 말뚝 종류별 휨강도시험 결과 (휨모멘트-중앙부 처짐 곡선)

표 1-1. 시험말뚝의 종류별 특징과 휨강도시험 결과

말뚝 직경 (mm)	말뚝 종류	특 징	휨강도 (kN·m)
450	PCFT말뚝	두께 6mm SKK400 강관 보강 / 전단키 설치	629.1
	PCFT말뚝	두께 6mm SKK400 강관 보강 / 전단키 미설치	640.0
	ICP말뚝	속채움 콘크리트(40MPa) 및 D16 철근 4EA 보강	218.3
	PHC말뚝	-	158.0
	강관말뚝(6T)	두께 6mm SKK400 강관	309.5
500	PCFT말뚝	두께 6mm SKK400 강관 보강 / 전단키 설치	1035.7
	강관말뚝(12T)	두께 12mm SKK400 강관	870.0
	PHC말뚝	-	191.7
	강관말뚝(6T)	두께 6mm SKK400 강관	444.5

배의 휨강도를 발휘하였고, 말뚝 직경이 450mm에서 500mm로 커질수록 기존 PHC말뚝 대비 PCFT말뚝의 휨강도 증가율이 큰 폭으로 증가하였다. 그리고 PCFT말뚝은 말뚝을 구성하는 두께 6mm 강관과 내부에 합성된 PHC말뚝 각각의 휨강도를 단순 합산한 것보다 1.35~1.63배 큰 휨강도를 발휘하였다. 또한 말뚝의 초기 처짐에 대한 휨모멘트 증분으로 정의되는 변형계수, K는 PCFT말뚝이 두께 12mm 강관말뚝보다 2배 큰 것으로 나타나 PCFT말뚝이 강관말뚝보다 수평변위 억제효과가 더 우수한 것으로 나타났다. 이러한 시험결과를 통해 강관에 의한 콘크리트의 구속효과로 인해 말뚝의 휨강도가 증가하는 것을 확인하였고, PHC말뚝 대비 구속효과에 의한 PCFT말뚝의 휨강도 증가율은 말뚝 직경이 커질수록 커지는 경향을 보였다.

뿐만 아니라 내부 충전 PHC말뚝과의 부착력 강화를 위해 강관 내벽에 전단연결재를 설치했을 때와 설치하지 않았을 때 PCFT말뚝의 휨강도는 큰 차이를 보이지 않았고, 휨강도시험이 진행되는 동안 PCFT말뚝의 합성부와 절단부의 경계부에서 강관과 내부 합성 PHC말뚝 사이에 상대변위의 발생여부를 육안으로 조사한 결과 PCFT말뚝이 극한상태에 도달할 때까지 합성부를 구성하는 강관과 내부 합성 PHC말뚝간에 상대변위는 발생하지 않았다. 이것은 원심성형 방식으로 PCFT말뚝을 제조할 때 강관과 PHC말뚝 사이에 상당한 크기의 부착력이 형성되었고, 이로 인해 강관 내벽에 전단연결재의 설치 유무와 관계없이 강관과 내부 합성 PHC말뚝이 완전합성 상태로 거동해서 PCFT말뚝의 휨강도가 거의 일정하게 발휘된 것으로 판단된다.

한편, PCFT말뚝의 전단강도 특성을 조사하기 위해 직경이 500mm인 PCFT말뚝과 PHC말뚝, 두께가 12mm인 강관말뚝에 대해 그림 1-7과 같이 KSF 4306에서 규정하는 방법에 따라 전단강도시험을 수행하였고, 식 (1-2)를 이용해서 하중 단계별로 말뚝에 가해지는 전단력, Z에 대한 말뚝 중앙부에서 처짐량을 측정하였다. 여기서 P=시험말뚝 중앙부 두 점에 가해진 하중을 나타낸다.

$$Z(kN) = \frac{P}{2} \tag{1-2}$$

그림 1-8은 전단강도시험에서 측정된 말뚝 종류별 전단력-중앙부 처짐량 곡선을 보인 것이고, 표 1- 2는 시험말뚝별 구조 특징과 전단강도시험에서 측정된 최대 전단력, 즉 전단강도를 정리한 것이다. 그림과 표에서 보듯이 PCFT말뚝은 동일 직경의 PHC말뚝과 두께 12mm의 강관말뚝 대비 각각 5.79배와 2.40배의 전단강도를 발휘해서 수평하중으로 인해 말뚝에 발생하는 전단력에 대해 상당히 큰 저항능력을 갖고 있는 것으로 나타났다. 특히 두께가 6mm인 강관 내부에 PHC말뚝이 합성된 구조를 갖는 PCFT말뚝의 전단강도는 동일 직경의 PHC말뚝과 두께가 12mm인 강관의 전단강도를 단순 합산한 것보다 1.70배 큰 것으로 나타났다. 특히 전단강도시험



그림 1-7. 말뚝의 전단강도시험 방법 및 전경

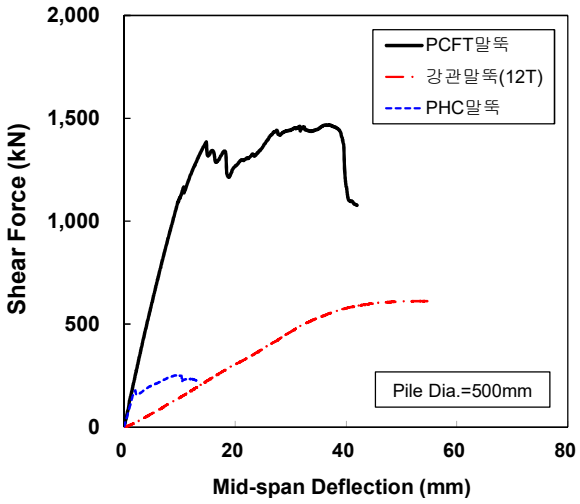


그림 1-8. 말뚝 종류별 전단강도시험 결과(전단력-중앙부 처짐 곡선)

표 1-2. 시험말뚝의 종류별 특징과 전단강도시험 결과

말뚝 직경(mm)	말뚝 종류	특징	전단강도(kN)
500	PCFT말뚝	두께 6mm SKK400 강관 보강 / 전단키 설치	1468.6
	강관말뚝	두께 12mm SKK400 강관	612.1
	PHC말뚝	A종	253.7

이 진행되는 동안 강관말뚝은 전단하중에 의해 말뚝 단면이 원형에서 타원으로 찌그러지면서 처짐이 크게 발생한 반면, PCFT말뚝은 말뚝이 극한상태에 도달할 때까지 단면 형상이 원형으로 유지되었다. 따라서 PCFT말뚝의 전단강도의 증대는 휨강도와 마찬가지로 내부에 합성된 PHC 말뚝이 강관의 찌그럼짐 현상을 억제하고 동시에 강관이 콘크리트의 파괴강도를 증대시키는 구

속효과가 발생했기 때문으로 판단된다.

(2) 기술의 독창성

일반적으로 교대나 옹벽, 그리고 지진 시 플랜트 구조물 등에 시공된 말뚝기초는 연직하중보다 수평하중에 의해 거동이 좌우되므로 휨강성이 큰 강관말뚝이 사용되어 왔다. 그러나 2000년대 들어 일본에서 가격이 비싼 강관말뚝의 사용에 따른 기초 공사비 증가를 억제하기 위해 수평하중이 전달되는 말뚝 상부에는 휨강성이 큰 강관말뚝을 사용하고 수평하중이 크게 전달되지 않는 말뚝 하부에는 휨강성은 작지만 가격이 저렴하고 높은 연직지지력이 발현되는 PHC말뚝을 사용한 강관 복합말뚝(HCP, Hybrid Composite Pile)이 개발되었다. 그리고 이 기술을 파일테크 등(2008)이 국내에 도입하면서 상부 강관말뚝에 작용하는 하중을 하부 PHC말뚝에 안정적으로 전달하기 위해 그림 1-9와 같이 상부 강관말뚝과 하부 PHC말뚝을 연결하는 말뚝 연결장치를 개발하였다.

그러나 강관 복합말뚝은 여전히 고가의 강관을 상부말뚝으로 사용하고 있을 뿐만 아니라 두께가 얇은 강관말뚝에 작용하는 하중이 하부 PHC말뚝에 전달될 때 응력집중으로 인해 하부 PHC말뚝 상부의 파손 방지를 위해 고가의 말뚝 연결장치를 사용해야 하고, 상부 강관말뚝과 구조물의 바닥콘크리트를 연결하기 위해 그림 1-10(a)와 같은 고가의 두부보강장치를 사용해야만 한다. 또한 상부 강관말뚝과 하부 PHC말뚝을 연결할 때 상·하부 말뚝의 중심축 일치 및 직진도 확보를 위해 그림 1-10(b)와 같이 현장에 설치한 롤러 구조물에 상,하부 말뚝을 올려놓은 상태에서 두 말뚝을 용접으로 연결해야 하므로 현장에 넓은 작업공간이 필요하다. 이와 같이 강관 복합말뚝은 강관말뚝에 비해 말뚝의 재료비는 일부 절감하였으나 시공과정에서 가격이 비싼 자재가 추가로 사용되고 시공을 위해 현장에 넓은 작업공간을 필요로 하는 등 강관말



그림 1-9. 상·하부말뚝 연결장치와 이를 이용해 제작한 강관 복합말뚝



(a) 두부보강재　　(b) 롤러를 이용한 상·하부말뚝 연결

그림 1-10. 강관 복합말뚝에 사용되는 두부보강재와 롤러를 이용한 상·하부말뚝 연결

뚝에 비해 공사비 절감과 시공성 개선을 극대화되지 못했다는 한계를 갖고 있다.

한편, 강관 복합말뚝이 갖고 있는 경제성 및 시공성 관련 문제들을 해결하기 위하여 방진욱 등(2013)은 그림 1-11과 같이 수평하중이 전달되는 깊이까지 PHC말뚝의 중공부에 종방향의 주철근을 삽입하고 콘크리트를 타설해서 말뚝 상부의 휨강도를 향상시킨 철근콘크리트 합성 PHC(ICP, Infilled Composite PHC)말뚝을 개발하였다. 특히 PHC말뚝의 중공부에 설치한 종방향 주철근이 속채움 콘크리트에 의해 PHC 말뚝의 내부에 배근된 PC강봉 및 횡방향 전단철근과 연결되도록 함으로써 PHC말뚝을 시공한 후에 추가로 설치한 종방향 주철근이 PHC말뚝과 일체화되도록 하였다.

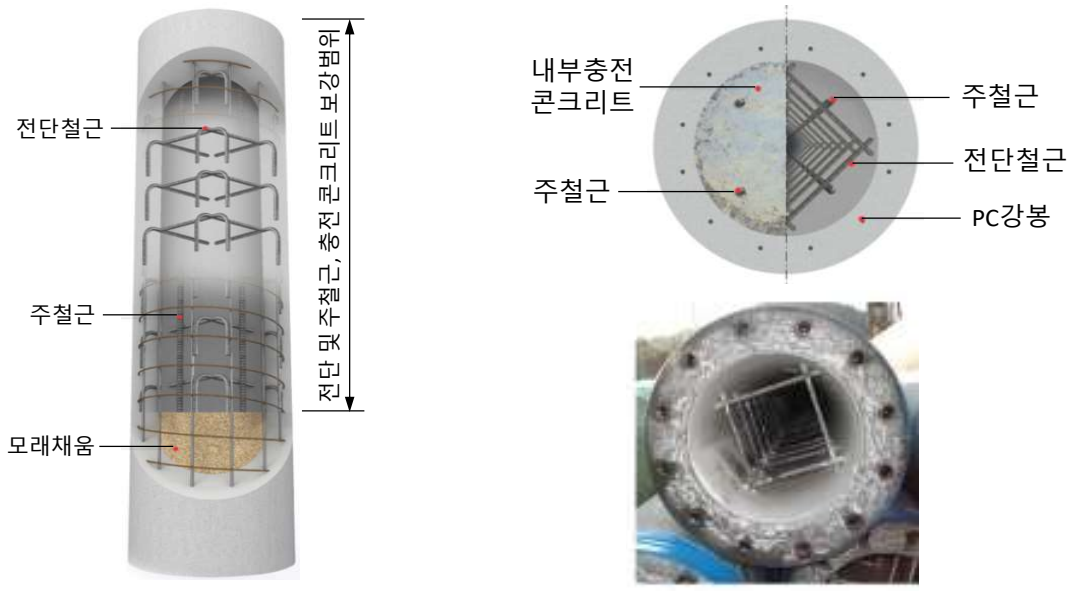


그림 1-11. ICP말뚝의 구조 개요도

ICP말뚝은 동일 직경의 강관말뚝보다 휨강성이 떨어지기 때문에 일정한 수평하중을 지지하기 위한 말뚝의 시공본수가 강관말뚝보다 증가하는 단점은 있지만 강관말뚝을 사용하지 않음에 따른 재료비 감소로 인해 전체적인 시공비는 강관말뚝을 사용할 때보다 약 30% 절감되고, 말뚝 두부를 구조물의 바닥콘크리트와 연결하는 두부보강 공사도 손쉽고 저렴해 공사비 절감효과가 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나 PHC말뚝의 중공부에 종방향 주철근을 배근하고 속채움 콘크리트를 타설하는 모든 공정이 현장에서 이루어지기 때문에 시공성이 좋지 않고 시공조건과 작업자의 숙련도에 따라 말뚝의 휨강도 특성이 달라질 수 있기 때문에 품질관리가 쉽지 않다는 단점을 갖고 있다.

이상에서 언급한 바와 같이 강관 복합말뚝은 상부 강관말뚝과 하부 PHC말뚝을 특정 연결장치로 연결하고 ICP말뚝은 PHC말뚝 상부의 중공부를 종방향 주철근과 속채움 콘크리트로 보강함으로써 강관말뚝을 사용할 때보다 기초 공사비를 절감하는데 일정부분 기여하였으나, 말뚝의 수평하중 지지성능에 비해 공사비가 여전히 고가일 뿐만 아니라 시공성은 오히려 낮아진 측면이 있다. 그 결과 많은 현장에서 말뚝의 수평하중 지지성능은 극대화하고 재료비는 강관말뚝보다 낮춰서 기초 공사비를 낮추고 시공성을 개선할 수 있는 새로운 복합말뚝 기술에 대한 요구가 계속되고 있다.

PCFT말뚝은 그림 1-12 및 1-13과 같이 하부 PHC말뚝의 상부에 PCFT말뚝을 연결한 PCFT 복합말뚝의 형태로 사용할 수 있는데, 이 경우 기존 강관 복합말뚝이나 ICP말뚝에 비해 말뚝의 구조적인 안정성과 시공성, 경제성 측면에서 많은 장점을 갖게 된다. 즉, 수평하중이 전달되는 깊이까지는 휨강성 능력이 뛰어난 PCFT말뚝을 사용하고 그 아래 깊이에서는 PHC말뚝을 사용하면 강관 복합말뚝이나 ICP말뚝보다 수평하중 지지능력이 크게 향상되어 수평하중에 의해 말뚝수량이 결정되는 경우 말뚝의 시공수량을 줄여 공사비를 절감할 수 있게 된다. 특히 상부와 하부말뚝의 두께가 다른 강관 복합말뚝과 달리 상부 PCFT말뚝과 하부 PHC말뚝은 두께가 동일해서 말뚝 연결부에서 하중 전달에 따른 응력집중이 발생하지 않아 말뚝이 구조적으로 안정하고, 상·하부말뚝의 연결이나 말뚝과 구조물의 바닥콘크리트를 연결하는데 고가의 연결장치와 두부보강 장치를 사용할 필요가 없어 말뚝 시공에 투입되는 재료비를 줄일 수 있다. 뿐만 아니라 강관 복합말뚝과 달리 상·하부말뚝의 연결을 여분의 굴착공에 하부 PHC말뚝을 삽입하고 그 상단에 상부 PCFT말뚝을 올려놓은 상태에서 수행할 수 있어 좁은 공간에서도 상하부말뚝을 손쉽게 연결할 수 있고, ICP말뚝과 달리 현장에서 진행되는 작업을 최소화함으로써 시공조건과 무관하게 시공품질을 일정하게 유지하는 것이 가능하고 시공관리도 간편하다는 장점도 있다.

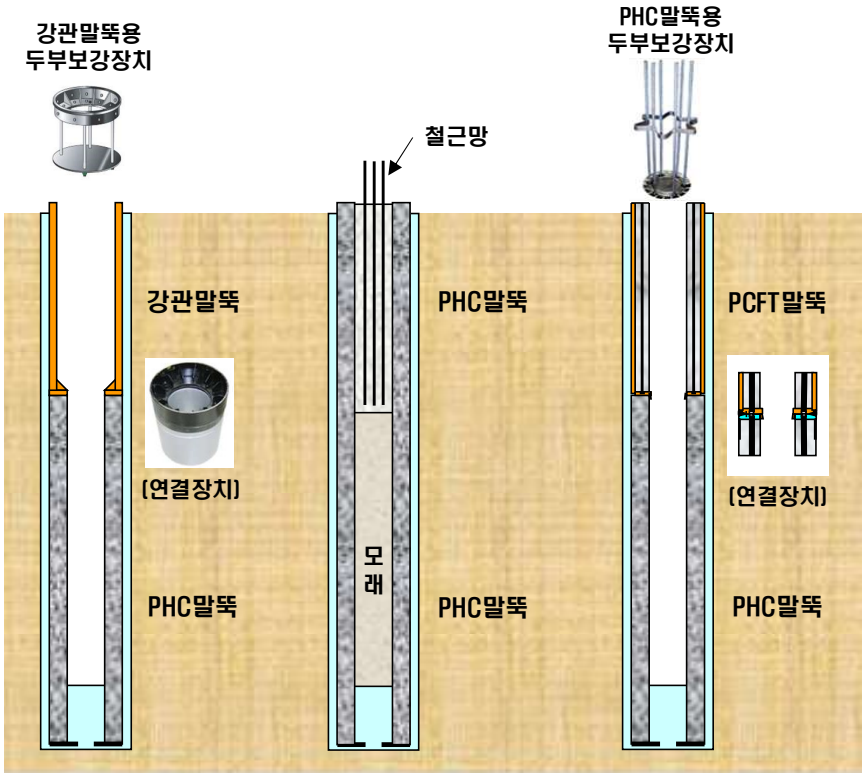


그림 1-12. 강관 복합말뚝과 ICP 말뚝 및 PCFT 복합말뚝의 구조 비교

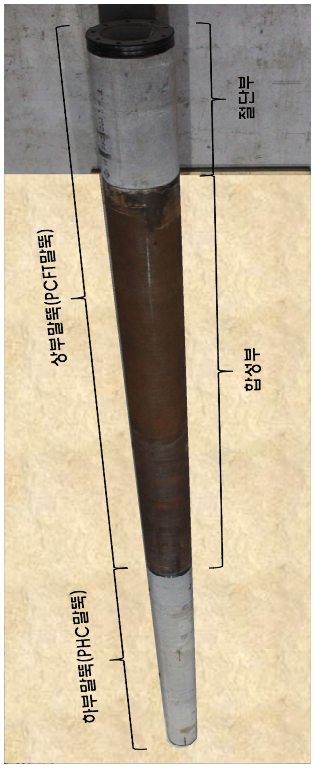


그림 1-13. PCFT 복합말뚝

다. 사업화 대상기술의 제품화

연직내력에 비해 휨내력이 작아 건축구조물의 기초로 많이 사용되는 PHC말뚝은 반원형 단면의 하부 몰드에 PC강봉과 나선철근으로 구성된 철근망을 위치시킨 상태에서 사일로(silo)에서 연직으로 떨어지는 고강도의 콘크리트를 타설한 후 상부 몰드를 덮고, 조립이 완료된 상·하부 몰드를 3~4g의 원심으로 회전시켜서 만들게 된다. 그러나 PCFT말뚝은 강관 내부에 중공형의 고강도 콘크리트를 타설해야 하기 때문에 PHC말뚝과 달리 사일로에서 연직으로 콘크리트를 타설하는 방법으로는 생산이 불가능하므로 고성능 펌프와 트레미관을 이용해서 강관 내부로 콘크리트를 타설하고, 이때 콘크리트의 물-시멘트 비는 송출이 용이하면서 압축강도는 KS F 4306에서 규정한 PHC말뚝의 최소치를 만족하도록 조정하였다. 즉, 그림 1-14와 같이 ① 내부에 철근망이 삽입된 강관을 하부 몰드에 위치시키고 ② 트레미관으로 콘크리트를 압송해서 강관 내부에 고강도 콘크리트를 타설한 후 ③ 말뚝 절단부에 사일로를 이용해서 콘크리트를 연직으로 타설하고 ④ 하부 몰드에 상부 몰드를 결합시킨 상태에서 PC강봉에 일정 크기의 긴장력을 도입한 다음 ⑤ 결합이 완료된 상·하부 몰드를 고속 원심성형하면서 양생하고 ⑥ 마지막으로 몰드를 탈형해서 PCFT말뚝의 제작을 완료하게 된다.



① 하부 몰드에 강관, 철근망 설치



② 강관에 콘크리트 주입



③ 말뚝 절단부에 콘크리트 타설



④ 상부 몰드 조립 및 긴장력 도입



⑤ 고속 원심성형 및 양생



⑥ 탈형 후 제품 완성

그림 1-14. PCFT말뚝의 제작 방법

라. 현재 기술 수준 및 추가 연구개발 필요성

(1) 현재 기술 수준

콘크리트 충전 강관(CFT)부재는 오랜 연구를 통해 콘크리트 부재나 강관 대비 압축 및 전단강도의 우수함이 이미 입증되었고, 그 결과 건축분야에서 현장 적용된 사례가 상당히 많다. 그리고 최근 들어서는 CFT부재가 갖는 공학적인 우수성을 교량 거더에 접목시키기 위한 연구가 한창 진행되었다(진원종 등 2009). 이들의 연구결과에 따르면 일반 강관에 비해 폐합 단면적이 동일하고 강관 내부가 강도가 27MPa인 콘크리트로 충전된 CFT거더의 휨강도는 20~40% 향상되었고, 강관 내부에 충천되는 콘크리트의 강도와 콘크리트에 가하는 선행응력이 클수록 그리고 강관 내벽에 전단보강재를 설치해서 강관과 충전 콘크리트를 완전한 합성상태로 만들수록 CFT거더의 휨강도는 더욱 커지는 것으로 나타났다. 또한 강관 거더는 일정수준 이상의 휨하중에서는 휨내력이 급격히 저하되지만 CFT거더는 콘크리트와 강관의 응력재분배로 인해 휨내력의 급격한 저하가 발생하지 않는 것으로 보고하였다. 이처럼 강관이나 콘크리트 부재에 비해 압축 및 휨강도 특성이 뛰어나고 휨하중에 대해 연성거동을 보여서 구조물의 안정성을 향상시키는 CFT부재는 현재까지 주로 건축물의 기둥이나 교량의 거더로 활용되어 왔으나, 정작 연직하중과 휨하중을 동시에 받아서 CFT부재의 성능을 최대로 활용할 수 있는 말

뚝분야에는 적용되지 않았다.

본 신청기관은 CFT부재의 우수한 강도특성을 말뚝에 도입하기 위해 두께가 5~6mm인 강관 내부에 PHC말뚝을 합성해서 말뚝의 휨강도와 전단강도를 대폭 향상시키고 강관말뚝 대비 재료비와 시공비도 절감할 수 있는 PCFT말뚝과 이 말뚝의 지지력을 정확하고 간편하게 평가할 수 있는 동재하시험용 PCFT말뚝을 개발하였다. 그리고 그림 1-15와 같이 관련 기술을 특허 제10-1229090호(발명의 명칭 : 합성말뚝과 이의 제조방법 및 이를 이용한 복합말뚝의 매입공법), 특허 제10-1694964호(발명의 명칭 : 합성말뚝) 및 특허 제10-2000194호(발명의 명칭 : 합성말뚝과 이의 제작방법)을 등록하였다.

한편, PCFT말뚝의 휨강도와 전단강도 특성을 파악하기 위해 공인된 시험기관에서 직경이 450mm와 500mm인 PHC말뚝 및 두께가 12mm인 강관말뚝과 함께 PCFT말뚝에 대해서 그림 1-16과 같이 휨강도시험과 전단강도시험을 수행하였다. 휨강도 실험결과 PCFT말뚝은 동일 직경의 PHC말뚝과 ICP말뚝 대비 각각 4.0~5.4배와 2.91배, 그리고 두께가 12mm인 강관말뚝 대비 1.19배의 휨강도를 발휘하였고, 전단강도 실험결과 PCFT말뚝은 동일 직경의 PHC말뚝과 두께가 12mm인 강관말뚝 대비 각각 5.79배와 2.40배의 전단강도를 발휘해서 수평하중으로 인해 말뚝에 발생하는 휨하중과 전단하중에 대해 상당히 큰 저항능력을 보였다. 그리고 이러한 PCFT말뚝의 강도특성 결과를 이용해서 PCFT말뚝과 이를 이용한 복합말뚝 기술에 대해 2017년 12월에 산업통상자원부 신기술 제1127호(기술명 : 프리스트레스를 도입한 콘크리트 충전 강관 합성말뚝을 사용한 복합말뚝 기술)로 인증을 받음으로써 PCFT말뚝의 구조성능 검증은 물론 PCFT말뚝의 높은 실용화 가능성을 확인하였다.



(a) 제10-1229090호 (b) 제10-1694964호 (c) 제10-2000194호 (d) 신기술 제1127호

그림 1-15. 특허증 및 신기술 인증서



(a) 휨강도시험



(b) 전단강도시험

그림 1-16. PCFT말뚝의 구조성능시험

현재 사업화 대상 기술인 PCFT말뚝은 실규모 휨강도 및 전단강도시험을 수행하여 구조적인 우수성이 입증되었고, PHC말뚝과 ICP말뚝 및 강관말뚝 대비 구조적인 측면이나 경제적인 측면에서 우수함 확인하였다. 또한 관련 핵심기술에 대해 특허의 등록과 출원을 완료하였고, 산업통상자원부로부터 구조성능에 대한 검증과 실용화 가능성이 높음을 평가받았다. 따라서 본 기술은 유사 환경에서 프로토타입의 자재 개발을 완료하고 실내 성능평가가 완료된 TRL6 단계에 있다고 할 수 있으며, 향후 PCFT 복합말뚝의 현장 시험시공을 통한 성능평가와 관련 설계기준 정립 및 구조계산서 작성을 위한 프로그램 개발, 원활한 제품 생산을 위한 자재수급 방안 구축, 시장 적용성 향상을 위한 국토부 신기술 인증 등이 구축되면 연구기간 내에 사업화단계인 TRL9 단계에 도달해서 상용화에 성공할 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 추가 연구개발의 필요성

사업화 대상 기술인 프리스트레스가 도입된 콘크리트 충전 강관(PCFT)말뚝을 사용한 복합말뚝은 수평하중을 받는 구조물이나 지진하중을 받는 구조물의 기초에 적용할 경우 기존 ICP말뚝이나 상부에 강관말뚝을 사용하는 강관 복합말뚝 대비 휨강도와 전단강도는 대폭 증대되고 재료비는 절감되며, 시공성이 개선되어 공사비 절감과 공기 단축 그리고 구조물의 안정성 향상을 기대할 수 있다. 현재 ICP말뚝이나 강관 복합말뚝 대비 PCFT 복합말뚝의 우수한 구조성능은 강관말뚝과 PCFT말뚝에 대한 실물 휨강도 및 전단강도시험을 통해 규명되었고, 재료비가 저렴해서 공사비가 절감되고 시공성이 우수하다는 점도 기존 시공사례에 대한 비교·분석을 통해 검증된 상태이다. 그러나 PCFT말뚝이나 PCFT 복합말뚝을 현장에 적용하기 위해서는 다음과 같은 몇 가지 항목들에 대한 개발이 추가되어야 한다.

(가) 현장 시험시공을 통한 PCFT 복합말뚝의 구조성능 및 수평지지력 증대 효과, 경제성 검증

PCFT말뚝이 ICP말뚝은 물론 두께 12mm 강관말뚝보다 휨강도와 전단강도가 큰 것은 중공형의 PHC말뚝을 외부에서 감싸고 있는 두께 6mm의 강관이 내부에 합성된 PHC말뚝을 구성하는 콘크리트의 파괴 시 발생하는 부피팽창을 구속하기 때문이며, 이러한 구속효과(confining effect)가 극대화되기 위해서는 외부 강관과 내부 PHC말뚝이 완전히 하나로 결합되어 완전합성상태가 되어야 한다. 만약 강관과 내부 합성 PHC말뚝이 완전 합성상태에 있지 않으면 강관에 의한 콘크리트의 구속효가가 떨어져 PCFT말뚝의 휨강도와 전단강도는 강도시험에서 측정된 것보다 작게 된다.

현재 기성말뚝의 대부분은 항타공법이나 매입공법으로 시공되며, 이들 공법으로 말뚝을 시공하기 위해서는 해머로 말뚝에 타격을 가하는 공정이 반드시 필요하다. 만약 PCFT말뚝이나 PCFT 복합말뚝을 시공하기 위해 말뚝에 타격을 가할 때 PCFT말뚝을 구성하는 강관과 내부 합성 PHC말뚝 사이에 균열이 발생해서 합성구조가 깨지면 이들 말뚝의 휨강도와 전단강도는 강도시험의 결과보다 작아지게 되며, 이러한 강도 저하는 말뚝의 수평지지력 저하로 연결된다. 따라서 현장에서 시험시공을 통해 PCFT말뚝이나 PCFT 복합말뚝을 항타 및 매입공법으로 시공할 때 PCFT말뚝을 구성하는 강관과 내부 합성 PHC말뚝 간에 상대변위나 균열이 발생하는지 여부를 확인하고자 한다. 그리고 동일 조건에서 강관 복합말뚝과의 비교시험을 통해 수평지지력을 포함한 수평거동 특성을 비교, 분석하고 시공에 투입된 시간과 비용 등을 비교함으로써 PCFT 복합말뚝의 수평지지력과 경제성의 우수성을 검증하고자 한다.

(나) 원활한 제품생산을 위한 최적의 말뚝 생산시스템 구축

PCFT 복합말뚝이 실용화되어 많은 현장에 적용될 경우 PCFT말뚝의 대량 공급을 위해 생산효율을 높이고 품질을 일정 수준 이상으로 유지하기 위해서는 강관 내부에 부배합의 콘크리트를 효율적으로 투입할 수 있는 방안이 도출되어야 한다. 현재 강관 내부에 콘크리트를 투입하는 것은 트레미관을 이용한 압력송출 방식과 스크류 회전체를 이용한 강재 투입방식, 컨베이어벨트를 이용한 이송방식으로 가능하다. 따라서 이들 3가지 투입방식에 대해 투입효율과 설비 구축비, 설비 유지관리비 등을 비교하고 여기서 선정된 2가지 투입방식에 대해 실물 제작 후 투입율 비교시험을 수행함으로써 부배합의 콘크리트를 강관에 효율적으로 투입할 수 있는 최적의 방식을 결정하고자 한다.

또한 PCFT말뚝은 두께가 5~6mm인 강관 내부에 PC강봉과 콘크리트를 타설한 후 원심성형을 통해 제작되므로 말뚝을 대량으로 원활하게 생산하기 위해서는 두께 5~6mm의 ERW강관을 적기에 수급하는 것과 강관 내부에 콘크리트를 효율적으로 투입할 수 있는 장치를 구비해야 한

다. 강관은 제조방법에 따라 강관 외벽에 용접비드가 나선형으로 돌출되는 Spiral강관과 직선의 용접비드가 강관 외벽으로 전혀 돌출되지 않는 ERW강관으로 구분된다. PCFT말뚝의 경우 상·하부 거푸집에 강관을 삽입하고 거푸집을 원심회전하는 방식으로 제조되므로 강관과 거푸집간의 간섭을 피하기 위해 용접비드가 강관 외벽으로 돌출되지 않는 ERW 방식의 강관을 사용해야 하고, 동시에 기존 PHC말뚝과의 직경을 맞추기 위해 457, 508, 609mm와 같은 표준사이즈가 아닌 450, 500, 600mm와 같은 정사이즈 직경의 강관을 사용해야 한다. 그러나 국내에서는 수요부족으로 인해 정사이즈의 ERW강관을 생산하지도 않을 뿐만 아니라 이러한 강관을 생산할 수 있는 설비도 구비하고 있지 않기 때문에 현재는 PCFT말뚝을 생산하기 위한 정사이즈의 ERW강관을 전량 중국에서 수입하고 있다. 따라서 PCFT말뚝의 원활한 생산과 일정 수준 이상의 품질 확보를 위해서는 국내에서 ERW방식의 정사이즈 강관을 조달하는 방안을 구축하는 것이 필요하다.

(다) PCFT 복합말뚝의 실용화를 위한 요소기술 개발

PCFT 복합말뚝을 현장에 시공하는 과정에서 지지층의 급격한 변화로 인해 말뚝 길이가 급변하는 경우가 빈번하게 발생하며, 이런 경우 현장의 지반조건에 맞도록 말뚝 길이를 탄력적으로 조절하기 위해서는 상부 PCFT말뚝과 하부 PHC말뚝을 용접방식이 아닌 볼트 이음방식으로 연결하는 것이 바람직하다. 그러나 기존에 개발된 볼트 이음방식은 이음장치의 중량이 무겁고 볼트 체결이 용이하지 않아 시공성이 나쁘고 이음장치가 중공형 구조로 제작되어 항타에너지에 의한 변형이 발생하여 구조적으로 안정하지 않을 뿐만 아니라 항타진동에 의해 말뚝과 이음장치를 연결하는 볼트가 풀리는 현상이 발생해서 말뚝 이음부의 구조안정성이 저하되는 문제를 갖고 있었다. 따라서 PCFT 복합말뚝의 실용화를 촉진하기 위해서는 시공성과 구조안정성이 향상될 수 있는 새로운 말뚝 연결방식의 개발이 필요하다.

또한 말뚝 시공이 종료되면 말뚝과 구조물 기초를 연결하는 두부보강 작업이 수행되는데, 강관말뚝의 경우에는 두부에 타공된 철근 결합홀에 두부보강 철근을 결합시키는 강결합 방법으로 두부보강을 실시하고 PHC말뚝과 ICP말뚝은 말뚝 중공부에 종방향 철근을 삽입하고 콘크리트를 충전하는 간접결합 방법으로 두부보강을 실시하고 있다. PCFT 복합말뚝의 경우에는 상부 PCFT말뚝의 합성부가 강관 내부에 PHC말뚝이 합성된 구조를 갖고 있어 타공이 불가능하기 때문에 두부보강이 강결합 방식으로는 불가능하고 간접결합 방식으로만 가능한 구조이다. 그러나 간접결합 방식의 두부보강은 강결합 방식에 비해 인장력과 휨력에 대한 저항능력이 현저히 떨어지기 때문에 두부보강부의 구조안정성 측면에서 바람직하지 않은 것으로 알려져 있다. 따라서 PCFT 복합말뚝의 두부보강부에 대한 구조안정성 확보를 위해서는 강결합 방식의 새로운 두부보강 방법의 개발이 필요하다.

(라) PCFT말뚝의 강도특성 결정을 위한 설계기준 개발

다양한 종류의 말뚝에 대한 휨강도 및 전단강도시험 결과에 따르면 PCFT말뚝은 기존 ICP 말뚝과 PHC말뚝, 두께가 12mm인 강관말뚝보다 휨강도 및 전단강도가 훨씬 크고, 이러한 강도증대는 파괴단계에서 강관이 내부에 합성된 PHC말뚝의 부피변화를 구속하는 구속효과 때문으로 규명되었다. 그리고 이러한 PCFT말뚝의 우수한 강도특성을 다양한 조건의 구조물 기초에 적용하기 위해서는 기존 설계기준이나 역학적 이론식으로 말뚝의 강도특성을 산정할 수 있는 방법이 정립되어야 하지만 현재까지 강관의 구속효과를 고려해서 CFT부재나 PCFT말뚝의 강도특성을 평가할 수 있는 설계기술은 정립되지 않은 상태이다. 따라서 PCFT말뚝에 대한 선행연구로 수행한 실규모 강도시험 및 3차원 수치해석 결과와 강관의 구속효과가 CFT부재의 휨거동에 미치는 영향에 대한 기존 연구결과 등을 이용해서 현행 한계상태설계법에 강관의 구속효과를 반영하는 방법으로 PCFT말뚝의 강도특성을 산정할 수 있는 설계기준을 개발하는 것이 필요하다.

(마) PCFT 복합말뚝의 설계를 위한 구조계산 프로그램 개발

PCFT말뚝의 제조를 위해서는 트레미관을 이용해 강관 내부에 콘크리트를 압출해야 하기 때문에 트레미관을 통한 콘크리트의 압출 효율을 고려할 때 합성부의 길이가 7~8m를 넘어가면 말뚝의 생산성이 저하될 수 있다. 이러한 PCFT말뚝의 길이 제약으로 인해 지지층의 심도가 깊은 현장에 PCFT말뚝을 적용하기 위해서는 PCFT말뚝의 하부에 PCFT말뚝을 결합시킨 복합말뚝의 형태로 제작해야 한다.

일반적으로 수평하중을 받는 많은 구조물의 기초는 군말뚝의 형태로 이루어지며, 군말뚝의 경우에는 말뚝의 위치에 따라 말뚝에 작용하는 하중요소가 달라진다. 또한 복합말뚝의 경우 말뚝과 지반의 강도특성과 말뚝에 작용하는 하중조건에 따라 말뚝의 깊이별 휨하중과 전단하중 분포가 달라진다. 이처럼 수평하중을 받는 구조물의 기초에 PCFT 복합말뚝을 적용하기 위해서는 설계과정에서 다양한 요소들을 고려해야 하기 때문에 말뚝에 대한 구조설계를 효율적으로 진행하기 위해서는 PCFT 복합말뚝의 강도특성을 고려한 구조설계 프로그램을 개발하는 것이 필요하다.

(바) 현장 적용성 제고를 위한 국토부 신기술 인증 신청 및 한국도로공사 기술마켓 등록

지진 시에는 지하층이 설치되지 않은 대부분의 구조물 기초에 수평하중이 작용하지만 교량의 교대와 도로변의 방음벽 및 옹벽 기초의 경우에는 상시에도 큰 크기의 수평하중을 받게 된다. 그리고 이처럼 상시에 큰 수평하중을 받는 구조물은 모두 도로와 관련이 있기 때문에 PCF

T 복합말뚝의 실용화와 현장적용 실적을 높이기 위해서는 이들 공사를 발주하는 국토부와 도로공사에서 본 사업화 대상기술에 대한 검증과 인증을 받는 것이 효율적이다. 따라서 본 사업을 통해 PCFT말뚝과 복합말뚝에 대한 설계기준이 정립되고 현장 시험시공을 통해 구조성능 및 경제성에 대한 검증이 완료되면 국토부 신기술 인증과 한국도로공사 기술마켓 등록을 추진하고자 한다.

2. 연구수행내용 및 성과

가. 연구개발 추진 전략 및 방법

본 연구개발은 프리스트레스가 도입된 콘크리트 충전 강관말뚝을 이용한 복합말뚝 기술을 실용화하는 것이 최종 목표이며, 이러한 목표를 효율적으로 달성하기 위해 요소기술의 개발순서와 연구역량을 고려한 담당 분야 등을 위탁기관인 전주대학교와 협의하여 결정하였다. 그 결과 표 2-1에서 보듯이 각각의 연구개발 내용별 추진 전략 및 방법이 도출되었고, 각 연구개발 내용을 수행할 기관을 결정하였다,

표 2-1. 연구개발 추진 전략 및 방법

일련번호	연구개발내용	추진 전략 및 방법	수행기간	수행기관
1	• PCFT 복합말뚝의 현장 시험시공 - 합성부의 강관-PHC말뚝 간 합성정도 검토 - PCFT 복합말뚝의 지지력 특성 - 경제성 검증	• 강관말뚝, HCP, PCFT 복합말뚝에 대한 수평재하시험 실시 • 말뚝 종류별 시험시공 공사비 비교 • 3차원 수치해석을 통한 PCFT말뚝 거동특성 분석	1 차년	파일웍스 전주대
2	• 최적의 말뚝 생산시스템 구축 - 원활한 강관 수급방안 결정 - 고효율 콘크리트 충전 방식 도출	• 국내외 강관 제조사별 강관 공급여부 및 정밀도, 가격 비교 • 트레미관 방식과 컨베이어벨트 방식에 대한 충전 효율 비교	2~3 차년	파일웍스
3	• PCFT 복합말뚝를 위한 요소기술 개발 - 상·하부말뚝 무용접 연결방법 개발 - 강결합 두부보강 방법 개발	• 무용접 연결방식에 대한 구조성능 및 시공성 검토 • 강결합 두부보강 방식에 대한 아이디어 도출 및 시제품 생산	2~3 차년	파일웍스
4	• PCFT말뚝의 강도특성에 대한 설계기준 개발 - P-M 상관도 작도 - 강관-PHC말뚝 합성여부 검토	• P-M 상관도 작도를 위한 P, M 산정방법 개발 • 3차원 수치해석을 통한 합성여부 조사	2 차년	파일웍스 전주대
5	• 구조계산 프로그램 개발 - 엑셀 기반 프로그램 개발	• 엑셀 기반의 PCFT 복합말뚝 설계를 위한 프로그램 개발	3 차년	전주대
6	• 기술 검증 위한 각종 기술인증 신청 - 국토부 건설신기술 신청 - 한국도로공사 기술마켓 등록	• 국토부 건설신기술 인증 신청서 접수 • 한국도로공사 기술마켓에 등록	2~3 차년	파일웍스

나. 연구개발 내용 및 결과

(1) PCFT 복합말뚝의 지지력과 경제성 및 구조성능 검증

(가) 현장 수평재하시험 결과

PCFT 복합말뚝과 HCP, 그리고 강관말뚝의 수평거동을 비교하기 위해 경기도 양주시에 위치한 ○○ 신축현장에서 직경이 500mm인 PCFT 복합말뚝 2본과 HCP 1본, 그리고 직경이 508mm이고 두께가 12mm인 STP 275 강종의 강관말뚝(SP) 1본을 매입공법으로 시공한 후 수평재하시험을 수행하였다. 현장 지반은 그림 2-1과 같이 지표면으로부터 실트질 모래로 이루어진 1m 두께의 매립층과 17m 두께의 풍화토층이 순서대로 존재하고, 풍화암층은 18m 깊이에서 출현하는 구조이다. 지하수위는 지표면 아래 8.9m 깊이에 위치하였고, 모든 시험말뚝의 선단은 풍화암 내에 위치하도록 하였다.

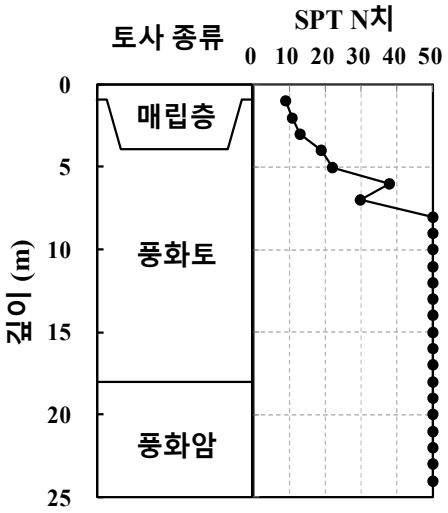


그림 2-1. 시험시공 현장의 지반조사 결과

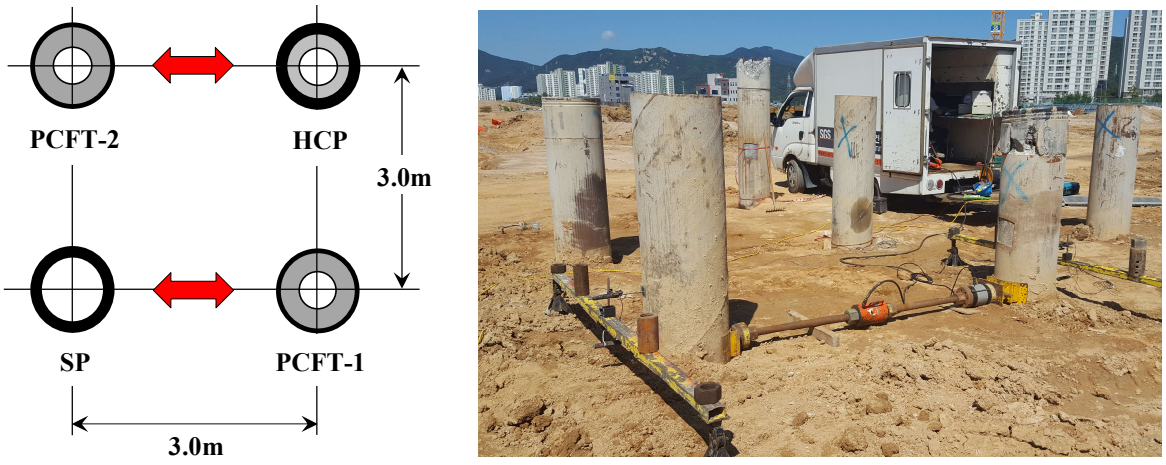
PCFT 복합말뚝과 HCP에서 상부말뚝으로 사용되는 PCFT말뚝과 강관의 길이는 모두 6m로 하였고, 상부말뚝의 하부에 연결되는 하부 PHC말뚝의 길이는 모두 15m로 하였다. 이때 복합말뚝을 구성하는 상부말뚝과 하부말뚝은 그림 2-2와 같은 볼트식 이음장치로 연결하였고, 경타 시 이음장치에 체결된 볼트가 항타진동에 의해 풀리는 것을 방지하기 위해 나사산 부분에 특수 도료가 도포된 풀림방지볼트를 사용하여 이음장치를 시공하였다. 시험말뚝의 배치는 그림 2-3과 같이 총 4본의 시험말뚝 중 PCFT-1 복합말뚝과 HCP, 강관말뚝(SP)은 지반에 19.5m 깊이까지 관입시켰고, PCFT-2 복합말뚝은 18.6m 깊이까지만 관입시켰다. 그 결과 PCFT-1 복합말뚝의 경우 상부 PCFT말뚝이 지반에 4.5m 관입되었지만, PCFT-2



그림 2-2. 볼트식 이음장치를 이용한 복합말뚝의 상·하부말뚝 연결

복합말뚝의 경우에는 상부 PCFT말뚝이 지반에 3.6m만 관입되도록 하였다.

총 4본의 시험말뚝을 매입공법으로 시공한 후 2주가 경과 했을 때 시험말뚝에 대한 수평재하시험을 수행하였다. 수평재하시험은 그림 2-3과 같이 2본의 말뚝 사이에 유압잭을 설치하고 서로를 반력말뚝으로 사용해서 하중을 가하는 방식으로 진행하였고, 기준빔(reference beam)에 고정된 LVDT를 이용해 수평하중이 재하되는 높이에서 수평하중 단계별로 말뚝의 수평변위를 측정하였다. 이 때 LVDT와 시험말뚝 간에 발생할 수 있는 마찰에 의해 수평변위가 왜곡되는 것을 최소화하기 위하여 LVDT가 접하는 말뚝 표면에 유리판을 부착하였다. 그리고 수평하중은 40kN씩 증가시켰고, 각 하중 단계별로 5분 동안 하중을 일정하게 유지하였다.



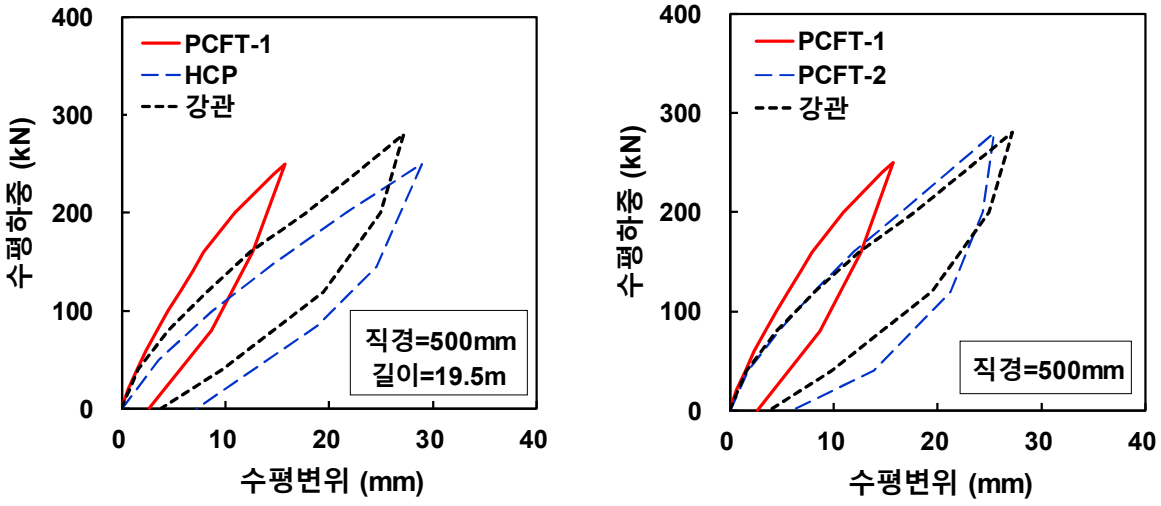
(a) 시험말뚝 배치도 (b) 수평재하시험 전경

그림 2-3. 시험말뚝에 대한 수평재하시험

말뚝의 수평지지력은 말뚝 두부에서 발생한 수평변위나 회전각이 일정 크기에 도달했을 때 말뚝에 가해진 수평하중으로 결정될 수 있다. Davidson 등(1982)은 말뚝 두부가 2° 회전했을 때 말뚝 두부에 가해진 하중을 극한수평지지력으로 정의했고, Meyerhof 등(1981)은 수평재하시험에서 측정된 수평하중-변위 곡선이 초반의 비선형에서 선형으로 전환되는 시점의 하중을 극한수평지지력으로 정의하였다. 또한 구조물기초설계기준(2015)에서는 말뚝 두부의 수평변위가 15mm에 도달했을 때 말뚝에 가해진 하중을 허용수평지지력으로 정의하고 있다. 본 연구에서는 재하시험 결과에 대한 분석의 편의성과 실무에서 일반적으로 사용되고 있는 현실성을 고려해서 수평재하시험의 결과에 구조물기초설계기준(2015)의 파괴기준을 적용해서 각 시험말뚝의 허용수평지지력을 결정하였다.

그 결과 PCFT-1, HCP, 강관말뚝의 허용수평지지력은 그림 2-4 및 표 2-2와 같이 각각 243.2kN과 151.5kN, 179.1kN으로 결정되었고, PCFT-1 복합말뚝에 비해 상부 PCFT말뚝의 지반내 관입길이가 0.9m 짧은 PCFT-2 복합말뚝의 허용지지력은 강관말뚝과 비슷한 186.5kN으로 결정되었다. 즉 상부말뚝의 지반 근입길이가 4.5m로 동일한 경우 PCFT 복합말뚝의 허용수평지지력은 HCP보다 60.5% 컸고, 직경이 8mm 더 큰 강관말뚝보다도 35.8% 큰 것으로 나타났다. 그리고 상부 PCFT말뚝의 관입길이가 0.9m 짧은 PCFT-2 복합말뚝은 PCFT-1 복합말뚝에 비해 허용수평지지력이 23.2% 감소하였다.

이처럼 PCFT 복합말뚝의 허용 수평지지력이 강관말뚝이나 HCP보다 크게 측정된 것은 휨강도시험 결과에서 보았듯이 말뚝 중앙부의 처짐량이 동일할 때 PCFT말뚝에 가해진 휨



(a) 동일 근입깊이 말뚝간 비교 (b) 다른 근입깊이 말뚝간 비교

그림 2-4. 시험말뚝에 대한 수평재하시험 결과

표 2-2. 시험말뚝의 허용수평지지력과 말뚝 두부의 수평변위

말뚝 종류	허용수평지지력 (kN)	수평변위(mm)	
		120kN 작용 시	240kN 작용 시
PCFT-1	243.2	5.6	14.6
PCFT-2	186.5	8.1	20.9
HCP	151.5	11.2	27.5
SP	179.1	8.3	22.4

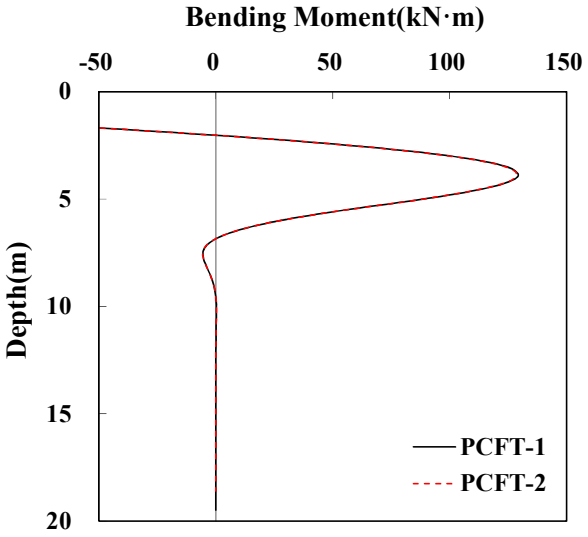


그림 2-5. 220kN의 수평력 작용 시 PCFT-1과 PCFT-2의 휨모멘드 분포

하중이 강관말뚝의 경우에 비해 약 2배나 클 정도로 강관말뚝과 PCFT말뚝의 휨강성 차이가 크기 때문이다. 그리고 PCFT-1과 PCFT-2 복합말뚝의 지지력 차이에 대한 원인을 규명하기 위하여 말뚝의 수평거동을 해석하기 위한 상용프로그램인 L-Pile을 사용하여 PCFT-1과 PCFT-2 복합말뚝의 두부에 220kN의 수평하중이 작용했을 때 말뚝에 발생하는 깊이별 휨모멘트의 변화를 분석하였다. 이때 풍화토의 SPT-N치와 내부마찰각은 각각 25/30과 27°로 하였고, 말뚝 두부는 고정단 조건으로 하였다. 그 결과 그림 2-5에서 보듯이 상부 PCFT말뚝이 지반에 4.5m 관입된 PCFT-1 복합말뚝의 경우에는 지표면으로부터 3.9m 깊이에서 129.4kN·m의 최대 휨모멘트가 작용하였고, PHC말뚝 부분에 해당하는 4.5m 깊이 아래에서는 휨모멘트가 113.8kN·m 이하로 PHC말뚝의 균열휨내력인 114.4kN·m를 초과하지 않았다. 반면 상부 PCFT말뚝이 지반에 3.6m 관입된 PCFT-2 복합말뚝의 경우에는 PHC말

뚝이 위치하는 3.7m하부 깊이에서 128.1kN·m의 최대 휨모멘트가 작용하였고, 특히 PHC말뚝이 위치하는 3.6~4.5m 깊이에서는 말뚝에 발생하는 휨모멘트가 말뚝의 균열휨내력을 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 PCFT-1 복합말뚝은 상부 PCFT말뚝과 하부 PHC말뚝 모두 휨모멘트에 대해 안전한 반면 PCFT-2 복합말뚝은 하부 PHC말뚝에 작용하는 휨모멘트가 균열휨내력을 초과하여 구조적으로 불안전한 상태에 있었고, 그로 인해 PCFT-1 복합말뚝보다 PCFT-2 복합말뚝의 수평변위가 크게 발생하고 허용수평지지력도 작은 것으로 판단된다.

또한 PCFT 복합말뚝과 HCP 및 강관말뚝의 수평거동을 비교하기 위해 말뚝 두부에 120kN과 240kN의 수평하중을 작용시켰을 때 하중 작용점에서 발생하는 수평변위를 비교한 결과, PCFT-1 복합말뚝의 수평변위는 HCP의 50% 정도에 불과하여 PCFT말뚝과 강관말뚝에 대한 휨강도시험 결과와 동일하였다. 그리고 강관말뚝은 PCFT-1 복합말뚝 대비 약 1.47~1.53배의 수평변위가 발생하여 휨강도시험 결과보다 수평변위가 다소 작게 발생하였으나, 이것은 휨강도시험에서는 강관말뚝의 직경이 PCFT말뚝과 동일한 500mm였던 반면, 현장시험에서는 강관말뚝의 직경이 508mm로 커짐에 따라 말뚝의 휨강성이 커졌기 때문으로 사료된다. 따라서 강관말뚝의 직경 차이 등을 고려할 때 현장 수평재하시험에서 측정된 PCFT 복합말뚝과 HCP, 강관말뚝의 수평하중-변위 거동은 상부말뚝에 대한 휨강도시험의 결과와 거의 동일함을 확인하였다.

(나) 경제성 분석

수평하중을 지지할 목적으로 시공되는 기존의 강관말뚝이나 HCP, ICP말뚝 대비 PCFT 복합말뚝의 경제성을 분석하기 위해 직경이 500mm이고 길이가 20m인 말뚝에 대해 공사비를 비교하였다. 이 때 모든 말뚝이 극한상태까지 하중을 지지한다고 가정하여 휨강도시험에서 측정된 각 말뚝의 휨내력을 고려하여 말뚝의 시공수량이 달라지는 점이 고려되었고, 기존의 강관말뚝과 HCP, ICP말뚝은 상·하부말뚝이 용접으로 연결되는 반면 PCFT 복합말뚝은 볼트 체결을 이용한 기계식 이음방법으로 연결되는 것으로 하였다.

표 2-3에서 보듯이 말뚝의 휨내력을 고려하지 않았을 때 말뚝 시공비는 ICP말뚝이 가장 저렴했고, PCFT 복합말뚝과 HCP, 강관말뚝의 순으로 비싼 것으로 나타났다. 이중 PCFT 복합말뚝은 동일 직경의 HCP와 강관말뚝 대비 각각 17.5%와 29.5% 공사비가 저렴한 것으로 산정되었다. 그러나 휨강도시험에서 측정된 4종류 말뚝의 휨내력 결과에 따르면 일정한 크기의 수평하중에 대해 HCP와 강관말뚝 1공이 시공될 경우 ICP말뚝은 2.44공이 시공되어야 하고 PCFT 복합말뚝은 0.84공이 시공되면 충분한 것으로 나타난다. 이러한 말뚝의 휨내

력 차이에 의한 말뚝의 시공수량 차이를 고려할 때 말뚝 공사비는 PCFT 복합말뚝이 가장 저렴했고, HCP와 강관말뚝, ICP말뚝의 순으로 시공비가 바싸지는 것으로 계산되었다. 특히 PCFT 복합말뚝의 시공비는 HCP에 비해 31.3% 저렴한 것으로 나타났다. 따라서 기존의 강관말뚝이나 HCP, ICP말뚝을 PCFT 복합말뚝으로 대체하면 말뚝의 재료비 절감 및 수평지지력 증대에 따른 시공본수 감소에 따른 공사비 절감은 물론 공기 단축도 가능해 경제적인 말뚝기초 시공이 이루어질 수 있다.

표 2-3. 기존 수평하중 지지말뚝 대비 재료비 비교

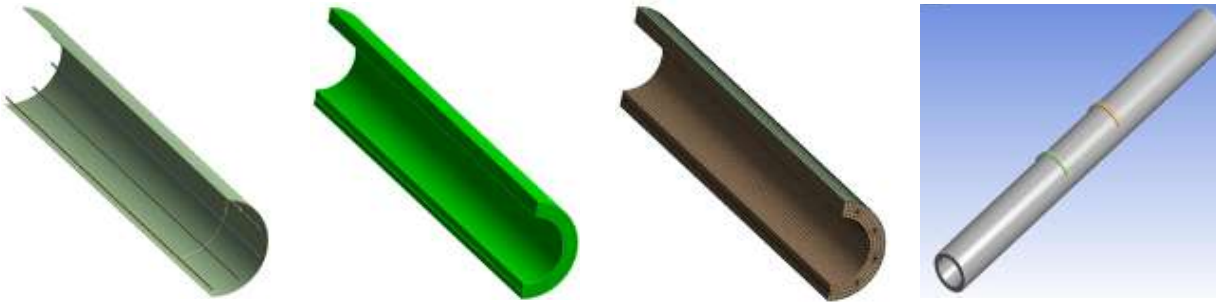
항목		PCFT 복합말뚝		강관말뚝(12T)		HCP		ICP말뚝	
		제원	가격(원)	제원	가격(원)	제원	가격(원)	제원	가격(원)
상부파일 (6m)		PCFT	2,080,000	12T 강관	838,200	12T 강관	2,522,000	PHC A종	1,856,000
하부파일 (14m)		PHC A종		12T 강관	1,955,800	PHC A종		PHC A종	
파일 연결장치		-	-	연결장치	150,000	-	-	-	-
파일 이음		1개소 (볼트)	20,000	1개소 (용접)	30,000	1개소 (용접)	30,000	1개소 (용접)	30,000
파일 속채움		-	-	-	-	-	-	모래/ 철근/Con	160,000
두부 보강장치		PCFT 파일용	100,000	강관 파일용	150,000	강관 파일용	115,000	중공부 철근	-
휨강도비율		120%		100%		100%		41%	
합계 (비율)	휨강도 비고려	2,200,000 (82.5%)		3,124,000 (117.1%)		2,667,000 (100%)		2,046,000 (76.7%)	
	휨강도 고려	1,833,330 (68.7%)		3,124,000 (117.1%)		2,667,000 (100%)		4,990,240 (187.1%)	

(다) PCFT말뚝의 합성여부 및 거동 특성 분석

PCFT말뚝에서 강관과 그 내부에 합성된 PHC말뚝의 합성여부와 구속효과 발생 여부 및 말뚝의 휨거동 특성을 조사하기 위해 상용 구조해석 프로그램을 사용하여 직경 500mm의

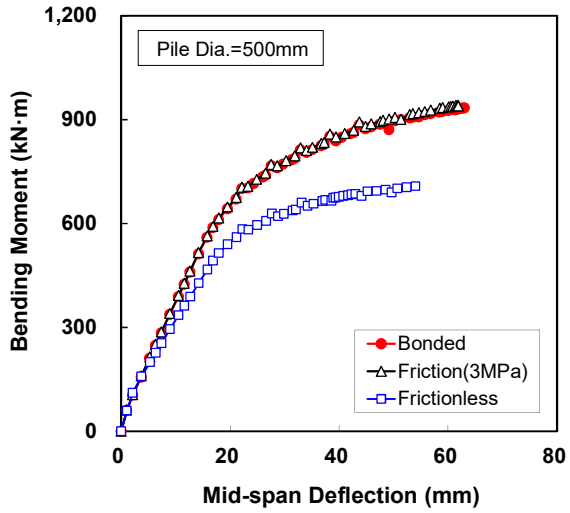
PCFT말뚝에 대해 3차원 비선형 구조해석을 수행하였다. 이를 위해 전단연결재에 의해 강관과 PHC말뚝이 완전히 결합된 경우(bonded)와 3MPa의 마찰력이 존재하는 경우(friction), 그리고 마찰력이 전혀 존재하지 않는 경우(frictionless)로 가정하고 PCFT말뚝에 대한 수치해석을 수행하였다. 이때 휨하중은 실제 휨강도시험에서 가했던 것과 동일하게 작용하였고, 강관과 PHC말뚝에 설치된 PC강봉에는 탄소성모델을 그리고 PHC말뚝을 구성하는 콘크리트에는 비선형모델을 적용하였다. 그림 2-6은 수치해석에 사용된 PCFT말뚝의 구성요소에 대한 유한요소 모델링을 나타낸 것이다.

그림 2-7은 PCFT말뚝을 구성하는 강관과 내부에 합성된 PHC말뚝 사이에 3가지의 접촉조건(완전결합, 마찰존재, 마찰없음)을 적용했을 때 PCFT말뚝의 휨거동을 해석한 결과이다. 그림과 같이 PCFT말뚝의 휨강성은 강관과 내부 합성 PHC말뚝 사이에 마찰이 전혀 없을 때보



[6T 강관 및 PC강봉] [PHC말뚝의 콘크리트] [PCFT말뚝 모델링] [하중재하 조건]

그림 2-6 PCFT말뚝의 수치해석을 위한 요소별 유한요소 모델링



[휨모멘트-침하량 곡선]



[접촉면 매근한 경우 단부 거동]



[접촉면 마찰 존재하는 경우 단부 거동]

그림 2-7. 강관과 내부 합성 PHC말뚝 사이에 마찰조건에 따른 PCFT말뚝의 휨거동 변화

다 3MPa의 마찰이 있거나 이들이 완전히 결합되었을 때 더 컸으며, 강관과 내부 합성 PHC말뚝 사이에 3MPa의 마찰이 존재하거나 이들이 완전 결합되었을 때에는 동일한 것으로 나타났다. 또한 수치해석 결과에서도 실물 휨강도시험에서 육안으로 관찰된 결과와 마찬가지로 강관과 내부 합성 PHC말뚝 사이에 일부 마찰력이 존재하거나 이들이 완전 결합된 경우에 PCFT말뚝의 합성부에서 강관과 내부 합성 PHC말뚝 간에 상대변위가 발생하지 않았다. 그러나 강관과 내부 합성 PHC말뚝 사이에 마찰이 전혀 없으면 실물 휨강도시험에서 관찰된 결과와 달리 휨하중에 의해 PCFT말뚝의 합성부에서 강관과 내부 합성 PHC말뚝 간에 약 1.5mm의 상대 변위가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 원심성형 방법으로 제작된 PCFT말뚝에서 강관과 내부 합성 PHC말뚝 사이에 3MPa 이상의 마찰력이작용하는 것으로 추정되며, 그로 인해 강관 내부에 전단연결재의 설치 유무와 관계없이 강관에 의한 구속효과에 의해 PHC말뚝과 강관말뚝보다 큰 휨강도와 전단강도를 발휘하는 것으로 판단된다.

그림 2-8은 직경 500mm PCFT말뚝과 이 말뚝을 구성하는 PHC말뚝 및 두께 6mm 강관에 대한 수치해석 결과를 실물 휨강도시험 결과와 비교한 것이다. 그림과 같이 두께 6mm 강관의 경우 휨강도시험에서 발생한 단면의 찌그러짐에 따른 침하량 과다가 수치해석에서는 고려되지 않아 초기 거동에서 큰 차이를 보였지만 휨강도는 시험결과와 비슷하게 예측되었고, PHC말뚝의 경우에도 거동 초기에는 시험결과와 수치해석 결과가 약간 차이를 보였지만 휨강도가 시험결과와 비슷하게 예측되었다. 반면 PCFT말뚝의 경우에는 수치해석 결과가 시험결과와 거동 초기부터 항복 이후까지 매우 유사하였으며, 휨강도의 크기도 시험결과와 비슷하였다. 이것은 PCFT말뚝을 구성하는 내부 합성 PHC말뚝이 강관의 단면 찌그러짐을 억제하고 강관은 내부 합성 PHC말뚝의 압축부 콘크리트 강도를 증대시키는 구속효과가 실물 시험과 수치해

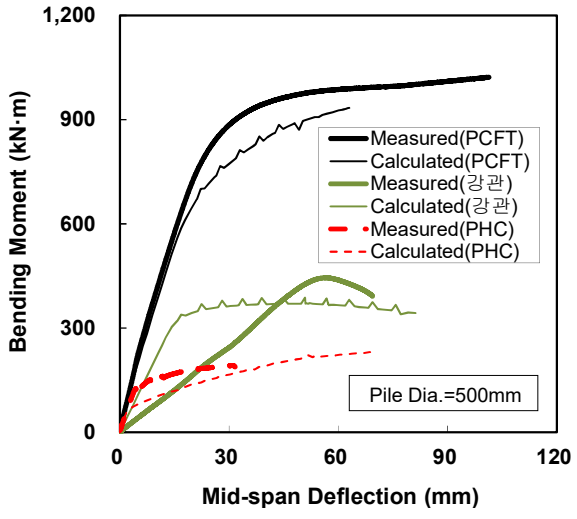


그림 2-8. PCFT말뚝에 대한 시험치와 수치해석 결과의 비교

석에서 모두 발생했기 때문으로 판단된다. 따라서 PCFT말뚝에 대한 실물 휨강도시험과 3차원 수치해석으로부터 얻어진 휨강도 거동과 말뚝 합성부에서 강관과 내부 합성 PHC말뚝의 상대변위 발생 유무 등을 비교한 결과 PCFT말뚝은 강관 내부에 전단연결재를 부착하지 않아도 강관과 내부 합성 PHC 사이에 일정한 크기의 마찰력이 작용해서 구속효과가 발생하고, 이로 인해 말뚝의 휨강도가 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타났다.

(2) PCFT말뚝의 최적 생산방식

(가) 강관 내부에 콘크리트 투입을 위한 최적 방식

PCFT말뚝의 생산성은 강관 내부에 부배합의 콘크리트를 타설하는 공정의 효율에 크게 좌우되며, 강관 내부에 콘크리트를 충전하기 위해서는 트래미관 또는 컨베이어벨트, 강관 내부에 설치된 스크류를 이용하는 방법을 적용할 수 있다. 이들 중에서 스크류 방식은 직경이 큰 콘크리트 관로를 제조할 때 사용하는 것으로 시간당 콘크리트 투입량을 용이하게 조절할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그러나 스크류의 길이가 길어지면 스크류와 스크류가 설치된 강관의 공차 부분에 콘크리트가 위치하고 콘크리트 투입이 중단되었을 때 이것이 강관 내벽에 경화되기 때문에 매일 작업을 시작할 때마다 강관 내벽의 콘크리트를 청소해야 하므로 생산성이 떨어지는 단점이 있어 검토 대상에서 제외하였다. 따라서 본 연구에서는 강관 내부로 부배합의 콘크리트를 투입하는 방법으로 트래미관을 이용하는 방법과 컨베이어벨트를 이용하는 방법에 대해서만 적용성을 검토하였다.

그 결과 그림 2-9(a)와 같이 PCFT말뚝 개발 초기에는 자주 사용하던 트레미관을 이용한 방식은 부배합의 콘크리트를 투입하는 과정에서 트레미관이 자주 막히는 현상이 발생하였고, 이를 해결하기 위해 약간의 강도 저하를 감내하면서 콘크리트의 W/C비를 높였음에도 불구하고 트레미관이 막히는 현장은 지속되었을 뿐만 아니라 단위 시간당 트레미관으로부터 토출되는 콘크리트의 양이 일정하지 않은 것으로 나타났다. 반면 그림 2-9(b)에 보이는 컨베이어벨트를 이용한 방법은 부배합의 콘크리트가 원활하게 강관으로 투입되었고, 더욱이 단위 시간당 콘크리트 투입량이 거의 일정하게 유지되는 특징을 보였다. 특히 이들 두 가지 콘크리트 투입방법으로 PCFT말뚝을 생산하면서 시간당 생산효율을 비교한 결과 트래미관을 이용했을 때에는 6.0m 길이의 말뚝을 생산하기 위해 강관 내부에 콘크리트를 투입하는데 35~40분이 소요되었고, 콘크리트 투입 과정에서 트래미관이 자주 막히는 현상이 발생하였다. 그러나 컨베이어벨트를 이용한 투입방법를 이용했을 때에는 6.0m 길이의 말뚝을 생산하기 위해 강관 내부에 콘크리트를 투입하는데 25~30분이 소요되었고, 트레미관 방법과 달리 강관 내부에



(a) 트래미관 이용법



(b) 컨베이어벨트 이용법

그림 2-9. 강관 내부에 콘크리트 투입 방식

콘크리트가 원활하게 투입되었다. 따라서 PCFT말뚝의 생산성 제고와 강관 내부에 콘크리트를 투입하는 공정에서 작업성을 고려하여 트레미관보다 컨베이어벨트를 이용하는 방법으로 콘크리트 투입설비를 구축하였고, 이를 통해 현재까지 PHC말뚝에 대한 생산성의 약 60% 수준까지 PCFT말뚝의 생산성을 증대시킬 수 있었다.

한편, PCFT 복합말뚝의 구조성능과 수평하중 지지능력을 평가하기 위해 현장에서 매입공법으로 시공된 직경 500mm의 PCFT 복합말뚝을 시공하는 과정에서 그림 2-10과 같이 상부 PCFT말뚝의 절단부가 경타에 의해 파손되는 사례가 발생하였고, 그 원인은 말뚝 절단부에 위치한 PHC말뚝에서 시멘트 함량이 부족했기 때문으로 나타났다. 즉 PCFT말뚝을 제조하기 위해 몰드 내부에 강관을 위치시키고 콘크리트를 투입한 후 몰드를 원심으로 회전시키는 과정에서 몰드 내면과 강관 외벽 사이에 1~2mm의 틈새가 발생했고, 이 틈새로 말뚝 절단부에 위치하는 콘크리트의 시멘트밀크가 강관 외벽 부분으로 다량 유출되어 절단부에 위치한 콘크리트의 강도가 저하된 것으로 밝혀졌다.



그림 2-10. 경타에 의한 PCFT말뚝 절단부 파손 사례



그림 2-11. PCFT말뚝의 강관 두부 외주면에 부착된 압축성 밴드

이처럼 PCFT말뚝의 절단부에서 시멘트밀크 유출에 따른 콘크리트의 강도 저하를 방지하기 위해 그림 2-11과 같이 강관을 몰드에 넣기 전에 강관의 두부 외주면에 2mm 두께의 압축성 밴드를 원주를 따라 부착하였다. 그 결과 강관 외주면에 부착된 압축성 밴드가 몰드 내면과 강관 외벽 사이에 존재하는 틈새를 막아 PCFT말뚝의 절단부에서 시멘트밀크가 유출되는 것을 방지하였고, 이러한 조치를 취한 이후에는 경타에 의해 PCFT말뚝의 절단부가 파손되는 사례가 한 건도 발생하지 않았다.

이상에서 언급한 바와 같이 다양한 조건으로 제작된 PCFT말뚝에 대한 실내강도시험을 통해 거동특성을 비교함으로써 구조적 우수성과 경제성을 극대화할 수 있는 말뚝 구조를 결정하였고, 현장 시험시공을 통해 생산과정에서 발생할 수 있는 품질문제를 개선하였다. 또한 다양한 방법으로 PCFT말뚝의 시제품을 생산함으로써 PCFT말뚝의 생산성을 극대화할 수 있는 제조방법을 도출하였다.

(나) ERW방식의 정사이즈 강관 조달 방안

기존 PHC말뚝의 직경은 강관말뚝과 달리 모두 450, 500, 600mm와 같이 정사이즈로 제작되기 때문에 PHC말뚝의 생산에 사용되는 몰드(mould)의 내경도 정사이즈에 맞추어져 있다. 따라서 PHC말뚝의 몰드를 이용해서 생산되는 PCFT말뚝을 제작하기 위해서는 PCFT말뚝의 합성부를 구성하는 강관의 외경이 정사이즈여야 하고, 동시에 강관 외면이 몰드의 내면과 밀착되기 위해서는 그림 2-12와 같이 외면에 용접비드가 형성되는 spiral방식이 아닌 용접비드가 전혀 없는 ERW방식의 강관이 사용되어야 한다. 그러나 현재 국내에서 생산되는 모든 ERW강관은 457, 508, 609mm와 같이 inch 단위의 직경만이 생산되고, 정사이즈 직경의 강관은 sprial방식으로만 제작되고 있다. 따라서 2018년 하반기에 국내 동부인천제철과 협의를 통해 PCFT말뚝용 ERW강관을 정사이즈 직경으로 제작하기 위한 협약 체결과



(a) Spiral강관



(b) ERW강관

2-12. 생산방식에 따른 강관의 종류

동시에 생산시스템을 갖추는 단계까지 협의되었으나 동부인천제철이 타사에 M&A되면서 정사이즈의 ERW강관 생산을 위한 그간의 협의가 무효화되었다.

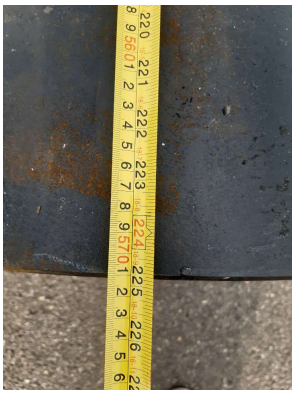
그래서 정사이즈 ERW강관의 국내 조달이 무산된 이후 이들 강관은 중국에서 조달하기 위해 중국에 위치한 3개 강관 제조사(EZ-스틸, Xinyue-스틸, Hunan-스틸)로부터 D498×6T×5,700L 제원의 ERW 샘플강관을 들여와서 주문사양과 제품의 실 제원을 비교하여 품질을 평가하고, 견적서를 통해 제시한 ton당 단가를 비교하여 가격경쟁력을 평가하였다. 강관의 품질 평가는 그림 2-13부터 그림 2-15과 같이 강관의 길이와 외경, 두께의 정확도에 대해 우선적으로 검증하였다. 그 결과 표 2-4에서 보듯이 강관의 두께는 3사 모두 6.0mm로 동일하였으나, 길이와 직경에서는 EZ-스틸이 가장 큰 오차를 보였고 Hunan-스틸이 주문사양에 가장 근접한 제원의 강관을 제조한 것으로 나타났다. 그리고 3개 강관 제



(a) 길이 측정



(b) EZ-스틸



(c) Xinyue-스틸



(d) Hunan-스틸

그림 2-13. 강관의 길이에 대한 품질 평가



(a) 길이 측정 (b) EZ-스틸 (c) Xinyue-스틸 (d) Hunan-스틸

그림 2-14. 강관의 직경 및 두께에 대한 품질 평가

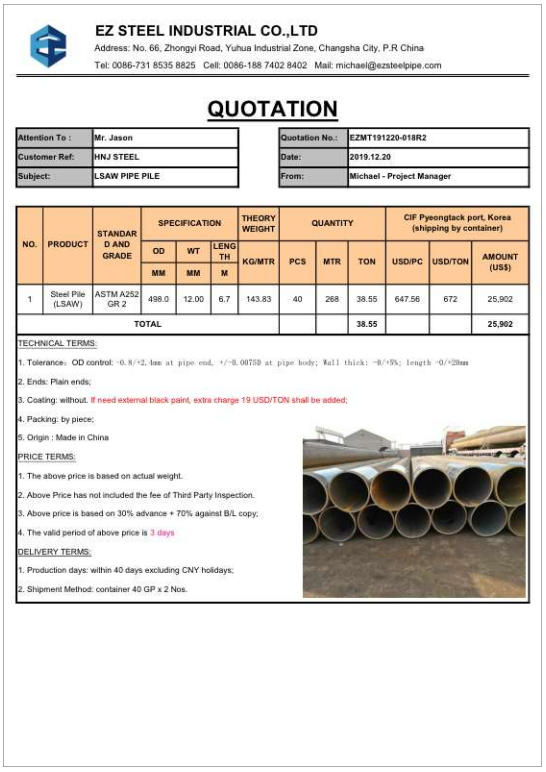


그림 2-15. 강관의 두께에 대한 품질 평가

표 2-4. 중국 강관 제조 3개사의 품질검증 결과

항목	EZ-스틸	Xinyue-스틸	Hunan-스틸
길이(mm)	571.6	571.0	570.3
직경(mm)	500.5	499.0	498.2
두께(mm)	6.0	6.0	6.0

조사가 견적서를 통해 제시한 D498×6T ERW강관의 ton당 가격은 그림 2-16에서 보듯이 EZ-스틸은 $672/ton, Xinyue-스틸은 $697/ton, 그리고 Hunan-스틸은 $689.2/ton이었다. 결국 가격적인 측면에서는 EZ-스틸이 가장 우수한 경쟁력을 갖고 있었지만 정밀도에서는 3개사 중에서 가장 뒤쳐지는 것으로 나타났다. 따라서 강관의 정밀도와 가격 모두를 고려하여 PCFT말뚝의 제조에 Hunan-스틸의 강관을 지속적으로 사용하는 것으로 결정하였다.



EZ STEEL INDUSTRIAL CO.,LTD
Address: No. 66, Zhongyi Road, Yuhua Industrial Zone, Changsha City, P.R China
Tel: 0086-731 8535 8825 Cell: 0086-188 7402 8402 Mail: michael@ezsteelpipe.com

QUOTATION

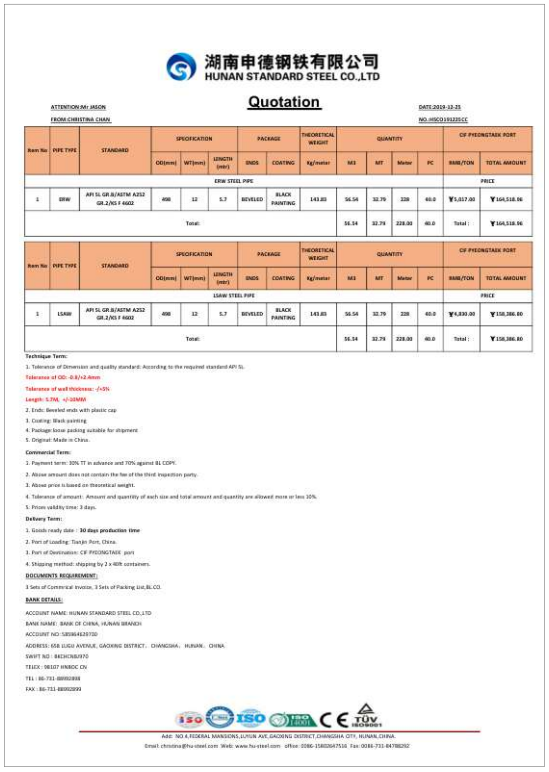
Attention To :	Mr. Jason	Quotation No.:	EZMT191220-018R2
Customer Ref:	HNJ STEEL	Date:	2019.12.20
Subject:	LSAW PIPE PILE	From:	Michael - Project Manager

NO.	PRODUCT	STANDARD AND GRADE	SPECIFICATION			THEORY WEIGHT	QUANTITY			CIF Pyeongtack port, Korea (shipping by container)		
			OD	WT	LENGTH	KG/MTR	PCS	MTR	TON	USD/PC	USD/TON	AMOUNT (US$)
			MM	MM	M							
1	Steel Pile (LSAW)	ASTM A252 GR 2	498.0	12.00	6.7	143.83	40	268	38.55	647.56	672	25,902
TOTAL									38.55			25,902

TECHNICAL TERMS:
1. Tolerance: OD control: -0.8/+2.4mm at pipe end, +/-0.0075D at pipe body; Wall thick: -0/+5%; length -0/+20mm
2. Ends: Plain ends;
3. Coating: without. If need external black paint, extra charge 19 USD/TON shall be added;
4. Packing: by piece;
5. Origin : Made in China

PRICE TERMS:
1. The above price is based on actual weight.
2. Above Price has not included the fee of Third Party Inspection.
3. Above price is based on 30% advance + 70% against B/L copy;
4. The valid period of above price is 3 days

DELIVERY TERMS:
1. Production days: within 40 days excluding CNY holidays;
2. Shipment Method: container 40 GP x 2 Nos.



湖南申德钢铁有限公司
HUNAN STANDARD STEEL CO.,LTD

Quotation

ATTENTION:MJ JASON
FROM:CHRISTINA CHAN
DATE:2019-12-25
NO.:HSCO1912251CC

Item No	PIPE TYPE	STANDARD	SPECIFICATION			PACKAGE		THEORETICAL WEIGHT	QUANTITY				CIF PYEONGTAEK PORT	
			OD(mm)	WT(mm)	LENGTH (mtr)	ENDS	COATING	Kg/meter	M3	MT	Meter	PC	RMB/TON	TOTAL AMOUNT
ERW STEEL PIPE													PRICE	
1	ERW	API 5L GR.B/ASTM A252 GR.2/JIS F 4602	498	12	5.7	BEVELED	BLACK PAINTING	143.83	56.54	32.79	228	40.0	¥5,017.00	¥164,518.06
Total:									56.54	32.79	228.00	40.0	Total :	¥164,518.06

Item No	PIPE TYPE	STANDARD	SPECIFICATION			PACKAGE		THEORETICAL WEIGHT	QUANTITY				CIF PYEONGTAEK PORT	
			OD(mm)	WT(mm)	LENGTH (mtr)	ENDS	COATING	Kg/meter	M3	MT	Meter	PC	RMB/TON	TOTAL AMOUNT
LSAW STEEL PIPE													PRICE	
1	LSAW	API 5L GR.B/ASTM A252 GR.2/JIS F 4602	498	12	5.7	BEVELED	BLACK PAINTING	143.83	56.56	32.79	228	40.0	¥4,830.00	¥158,386.80
Total:									56.56	32.79	228.00	40.0	Total :	¥158,386.80

Technique Term:
1. Tolerance of Dimension and quality standard: According to the required standard API 5L
Tolerance of OD: -0.8/+2.4mm
Tolerance of wall thickness: -/+5%
Length: 5.7M, +/-10MM
2. Ends: Beveled ends with plastic cap
3. Coating: Black painting
4. Package:loose packing suitable for shipment
5. Original: Made in China.

Commercial Term:
1. Payment term: 30% TT in advance and 70% against BL COPY.
2. Above amount does not contain the fee of the third inspection party.
3. Above price is based on theoretical weight.
4. Tolerance of amount: Amount and quantity of each size and total amount and quantity are allowed more or less 10%.
5. Prices validity time: 3 days.

Delivery Term:
1. Goods ready date: 30 days production time
2. Port of Loading: Tianjin Port, China.
3. Port of Destination: CIF PYEONGTAEK port
4. Shipping method: shipping by 2 x 40ft containers.

DOCUMENTS REQUIREMENT:
3 Sets of Commercial Invoice, 3 Sets of Packing List,BL:CO.

BANK DETAILS:
ACCOUNT NAME: HUNAN STANDARD STEEL CO.,LTD
BANK NAME: BANK OF CHINA, HUNAN BRANCH
ACCOUNT NO: 585964620730
ADDRESS: 658 LUGU AVENUE, GAOXING DISTRICT, CHANGSHA, HUNAN, CHINA
SWIFT NO : BKCHCNBJ970
TELEX : 96107 HNBOC CN
TEL : 86-731-88892888
FAX : 86-731-88892899

Add: NO.4,FEDERAL MANSIONS,LUYUN AVE,GAOXING DISTRICT,CHANGSHA CITY, HUNAN,CHINA.
Email: christina@hu-steel.com Web: www.hu-steel.com office: 0086-15880647516 Fax: 0086-731-84788292

그림 2-16. EZ-스틸과 Hunan-스틸에서 제시한 견적서

(3) PCFT 복합말뚝의 실용화를 위한 요소기술

(가) 수평핀 결합방식의 이음장치

PCFT 복합말뚝의 상부 PCFT말뚝과 하부 PHC말뚝은 수평핀 결합방식의 무용접 이음방법으로 연결되었으며, 이 이음방법에 사용되는 이음구는 그림 2-17과 같이 상·하부 말뚝의 이음측 단부에 고정되는 형상이 동일한 조인트 상판과 하판, 조인트 상·하판을 말뚝에 고정하기 위한 압착볼트, 조인트 상·하판을 결합시키는 앵커식 테이퍼형 수평핀으로 구성된다. 이러한 수평핀 결합방식의 이음장치는 다음과 같은 3가지 특징을 갖는다.

● 특징 1 : 상·하판 결합형 이음구

PCFT 복합말뚝에 사용되는 무용접 이음장치는 그림 2-18에서 보이듯이 상부 PCFT말뚝에 부착되는 상판과 하부 PHC말뚝에 부착되는 하판으로 구성되며, 상판과 하판을 결합함으로써 상부말뚝과 하부말뚝을 연결하게 된다. 조인트 상·하판은 인장강도가 500MPa 이상이고 항복강도가 320MPa 이상인 흑연구상주철(GCD500)로 제작되며, 상판의 하면과 하판의 상면에 형성된 테이퍼형의 돌기부와 수용부가 서로 맞물려 조립되는 중실형 판구조로 이루어져 기존의 수직볼트 이음방식에 사용된 중공형 연결블럭과 달리 편타격 및 휨하중에도 전혀 변형되지 않는 특징이 있다. 그리고 돌기부가 수용부에 결합될 때 원주방향으로 약

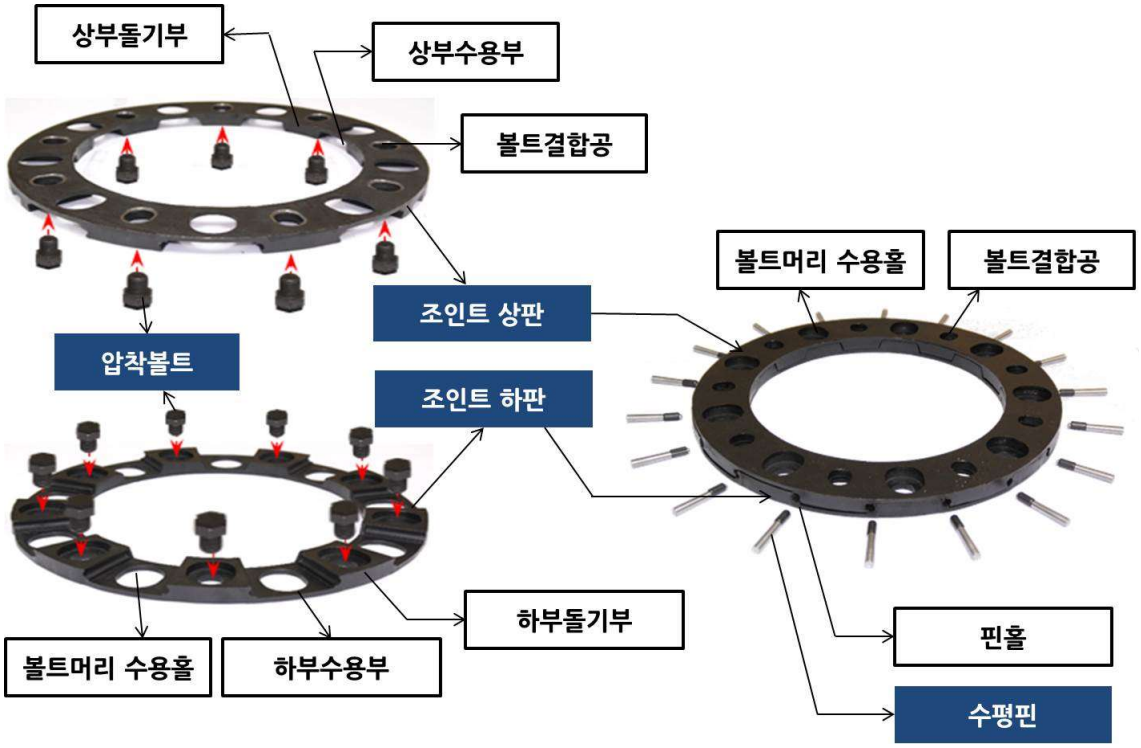


그림 2-17. PCFT 복합말뚝의 무용접 이음방법

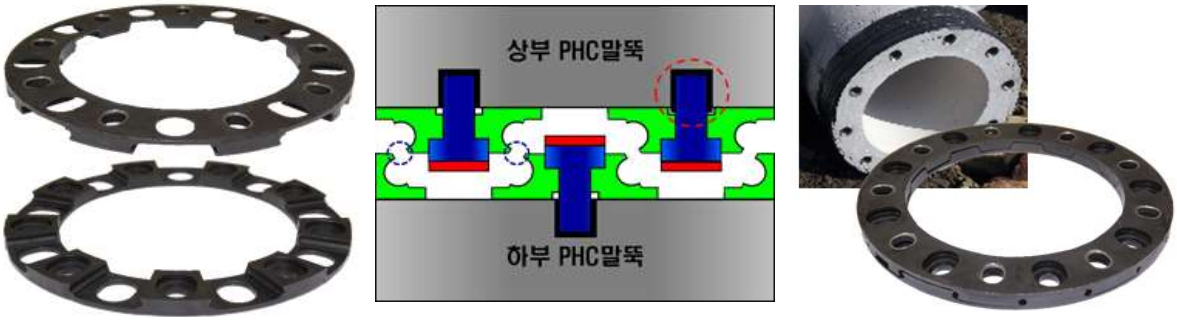


그림 2-18. 상·하판 결합형 조인트

10mm의 유격이 존재하도록 함으로써 별도의 가이드장치를 사용하지 않고도 조인트의 상판과 하판을 중심축이 일치된 상태에서 용이하게 결합시킬 수 있어 시공성이 우수하다. 또한 조인트 상·하판의 상·하면에서 볼트결합공 가장자리에 폭 3mm, 깊이 2mm의 PC너트 수용홈을 형성하여 말뚝 제조과정에서 PHC말뚝의 단부보다 PC너트가 돌출된 말뚝에 신기술을 적용할 경우 돌출된 PC너트가 PC너트 수용홈에 삽입되도록 하여 돌출된 PC너트에 항타에너지가 집중되어 말뚝이 파손되는 것을 방지할 수 있다. 뿐만 아니라 조인트를 상판과 하판으로 분리함으로써 상·하판을 PHC말뚝의 단부에 볼트로 체결할 때 임팩렌치를 사용하는

것이 가능하고, 표 2-5에서 보이듯이 기존 수직볼트 이음방식의 연결블럭에 비해 중량을 거의 1/2로 줄임으로써 중량물 취급에 따른 작업자의 안전사고(요추손상)를 줄이고 시공성을 개선하였다.

표 2-5. 수직볼트 이음방식과 수평핀 결합방식에 사용되는 연결장치 중량 비교

직경(mm)	수직볼트 이음방식(일체형) (kg/EA)	신규방식(수평핀 결합방식)	
		상판(kg/EA)	상·하판(kg/set)
500	24	7	14
600	33	9	18

● 특징 2 : 압착볼트를 이용한 볼트 풀림방지 시스템 적용

조인트 상·하판을 상·하부 PHC말뚝의 이음측 단부에 부착하기 위해서는 그림 2-19와 같이 머리 상면에 고무판이 부착된 압착볼트를 말뚝 단부에 설치된 PC 너트에 체결해야 한다. 이렇게 하부말뚝의 두부에 부착된 하판에 상부말뚝의 선단에 부착된 상판을 거치하면 상부말뚝의 자중에 의해 압착볼트의 머리에 부착된 고무판이 눌려 압축되면서 압착볼트의 머리에 큰 크기의 압축력과 마찰력이 발생하게 된다. 이음말뚝에 가해진 항타진동에 의해 볼트가 풀리기 위해서는 볼트가 체결방향과 역방향으로 회전하면서 돌출되어야 하는데 고무판 압축으로 인해 압착볼트의 머리부에 발생한 압축력과 마찰력이 볼트의 회전과 돌출을 억제함으로써 압착볼트는 항타진동에 의해 풀리지 않게 된다.

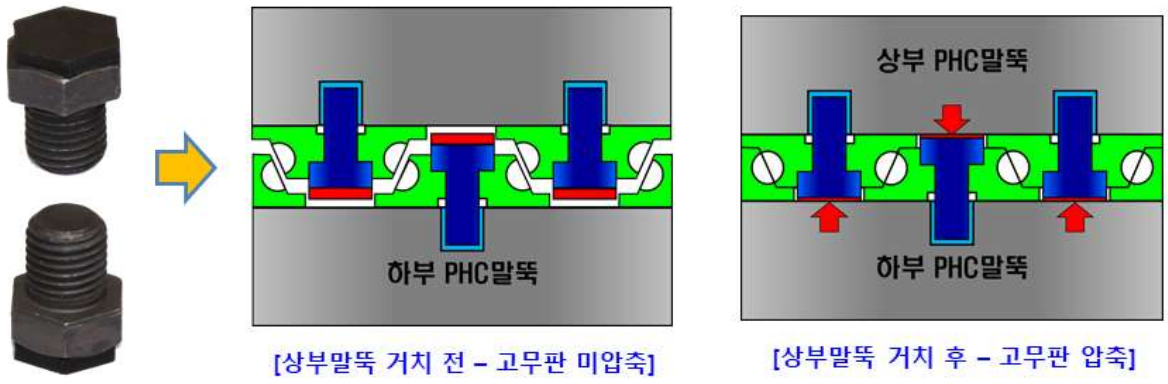


그림 2-19. 압착볼트를 이용한 볼트 풀림방지 시스템 적용

● 특징 3 : 앵커식 테이퍼형 수평핀 사용

조인트의 상판과 하판이 결합되면 그림 2-20과 같이 상·하판의 돌기부 측면에 형성된 반

원형의 연결홈이 만나서 원형의 핀홀이 형성되고, 이 핀홀에 앵커식 테이퍼형 수평핀이 삽입되어 조인트 상·하판이 결합된다. 조인트 측면에 형성되는 핀홀은 외측에서 내측으로 갈수록 직경이 작아지는 테이퍼형으로 형성되고 수평핀 또한 핀홀과 동일하게 테이퍼형으로 제작되며, 수평핀의 내측 단부에는 외경이 8mm인 스프링강 재질의 스프링핀이 결합된다.

핀홀과 수평핀이 모두 테이퍼형으로 되어 있어 수평핀은 전체 길이의 2/3가 타격없이 핀홀에 삽입되며 이후 타격에 의해 수평핀의 단부에 결합된 스프링핀이 직경 7.4mm의 핀홀 끝단에 삽입되어 고정됨으로써 앵커식 테이퍼형 수평핀이 핀홀에 체결된다. 이때 말뚝에 항타진동이 가해져도 스프링핀이 핀홀에 고정되어 있어 수평핀은 핀홀에서 이탈하지 않으며, 수평핀을 강하게 타입할수록 수평핀과 핀홀의 밀착도가 높아져 테이퍼형 수평핀에 의한 조인트 상·하판의 결합력은 극대화되는 특징이 있다.

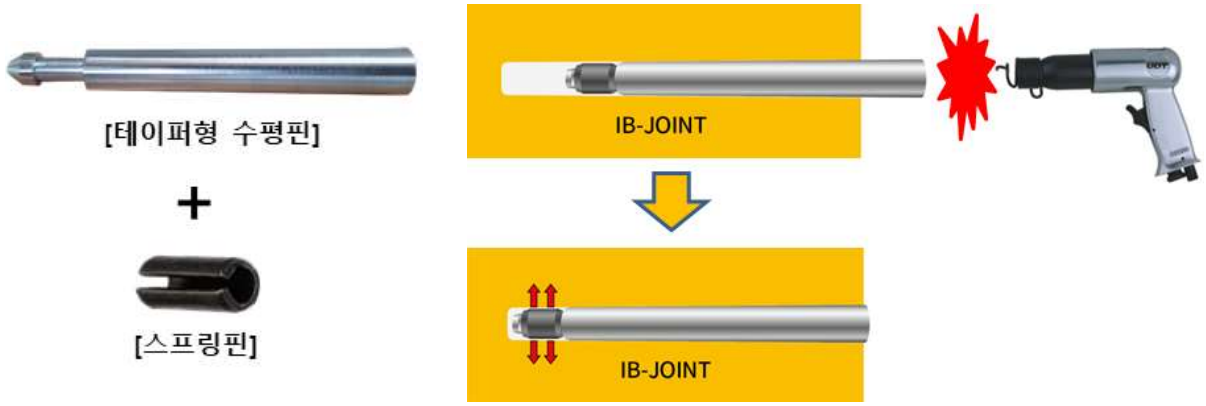


그림 2-20. 앵커식 테이퍼형 수평핀을 이용한 핀이탈 방지

새로 개발된 수평핀 결합방식의 무용접 이음방법을 이용해서 상부 PCFT말뚝과 하부 PHC말뚝을 연결하기 위해서는 그림 2-21과 같이 먼저 야적된 PCFT말뚝과 PHC말뚝의 이음측 단부에 전동임팩렌치와 압착볼트를 이용해서 조인트 상·하판을 부착하고, 하부말뚝을 서비스홀에 삽입한 후 하부말뚝에 부착된 하부 조인트에 상부 조인트가 결합된 상부말뚝을 거치한다. 그리고 상·하부 조인트의 결합으로 형성된 조인트 측면의 핀홀에 에어해머를 이용해서 테이퍼형 수평핀을 삽입·고정함으로써 상부 PCFT말뚝과 하부 PHC말뚝의 이음시공을 완료한다. 이때 말뚝에 조인트 상·하판을 부착할 때 사용된 압착볼트의 체결상태에 대한 품질검사는 디지털 토크렌치를 이용해 토크값을 측정하는 방법으로 수행한다. 또한 시공성 향상을 위해 압착볼트는 전동임팩을 이용해서 체결하고 핀홀에 테이퍼형 수평핀을 타입하는 것도 에어해머를 이용해서 수행할 수 있다.



① 말뚝에 상·하판 부착



② 상·하부말뚝 거치



③ 수평핀 체결

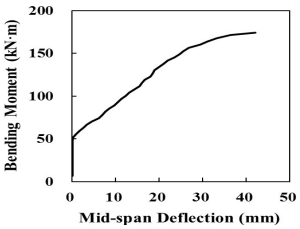


④ 시공 완료

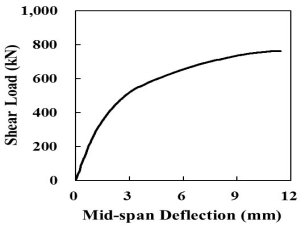
그림 2-21. 수평핀 결합방식를 이용한 말뚝 이음시공 순서

한편, 수평핀 이음방식으로 연결된 말뚝 이음부에 대한 구조성능을 검증하기 위해 직경이 500mm이고 길이가 5m인 PHC말뚝(A종) 2본과 600mm이고 길이가 6m인 PHC말뚝(A종) 2본을 무용접 이음장치로 연결한 후 KS F 4306에서 규정하는 방법으로 말뚝 이음부에 대한 휨강도 및 전단강도, 인장강도, 압축강도시험을 실시하였다. 실내강도시험 결과 그림 2-22와 2-23 그리고 표 2-6과 2-7에서 보는 바와 같이 신기술로 연결된 PHC말뚝 이음부는 말뚝 본체(A종)의 기준 휨내력과 전단내력, 인장내력, 압축내력을 상회하여 강도를 발휘하여 구조적으로 안정한 것으로 나타났다.

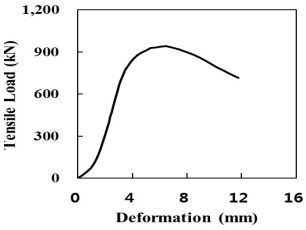
또한, 수평핀 결합방식으로 연결된 PCFT 복합말뚝 이음부의 구조안전성 검증을 위해 상용 구조해석 프로그램인 ANSYS를 이용해서 이음말뚝의 이음부에 대한 3차원 수치해석을 수행하였다. 직경 500mm PHC말뚝(A종)의 이음부에 말뚝 본체의 기준 허용내력에 해당하는 휨하중과 전단하중, 인장하중, 압축하중이 작용했을 때 그림 2-24 및 표 2-8과 같이 모든 하중조건에서 무용접 이음장치에 발생한 최대응력은 조인트의 구성재료인 GCD500의 항복응력을 초과하지 않는 것으로 나타나 신기술로 시공된 PHC말뚝 이음부는 구조적으로 안전함을 확인하였다.

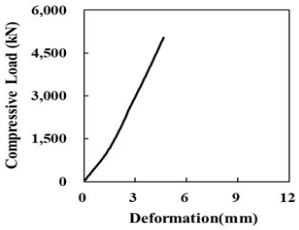
(a) 휨강도시험 전경 및 결과

(b) 전단강도시험 전경 및 결과

(c) 인장강도시험 전경 및 결과

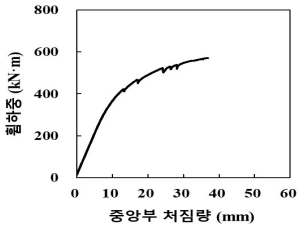



(d) 압축강도시험 전경 및 결과

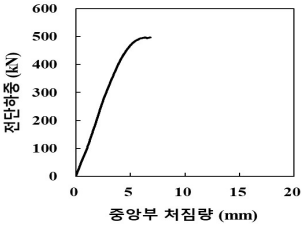
그림 2-22. 직경 500mm PHC말뚝에 대한 실내강도시험 전경 및 결과

표 2-6. 직경 500mm PHC말뚝(A종)의 이음부에 대한 실내강도시험 결과

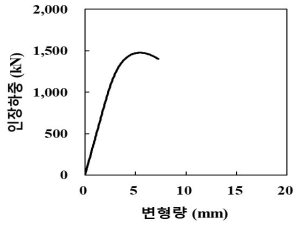
구 분	휨강도	전단강도	인장강도	압축강도
허용기준	155.0kN·m	228.6kN	749.5kN	1,730.0kN
시험결과	174.0kN·m	381.2kN	941.7kN	5,036.0kN 이상
판 정	O.K	O.K	O.K	O.K

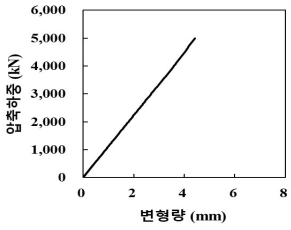
(a) 휨강도시험 전경 및 결과

(b) 전단강도시험 전경 및 결과

(c) 인장강도시험 전경 및 결과

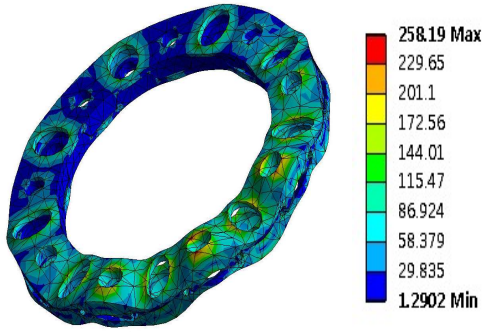



(d) 압축강도시험 전경 및 결과

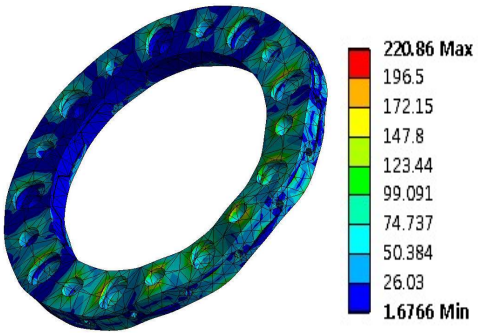
그림 2-23. 직경 600mm PHC말뚝에 대한 실내강도시험 전경 및 결과

표 2-7. 직경 600mm PHC말뚝(A종)의 이음부에 대한 실내강도시험 결과

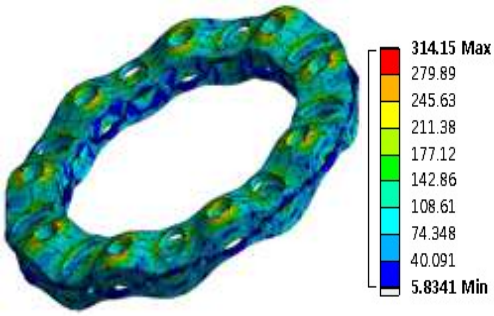
구 분	휨강도	전단강도	인장강도	압축강도
허용기준	250.2kN·m	311.0kN	998.6kN	2,360.0kN
시험결과	568.4kN·m	496.9kN	1,447.3kN	4,998.0kN 이상
판 정	O.K	O.K	O.K	O.K



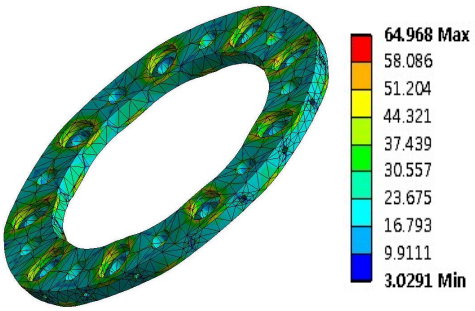
(a) 휨하중 작용 시



(b) 전단하중 작용 시



(c) 인장하중 작용 시



(d) 압축하중 작용 시

그림 2-24. 신기술이 적용된 말뚝이음부에 대한 수치해석 결과

표 2-8. 수평핀 결합방식 이음장치의 수치해석을 통한 안전성 검토

구 분	재료의 항복강도	수치해석 최대응력	안전 여부
휨강도시험(파괴)	320 MPa	258.2 MPa	O.K
전단강도시험	320 MPa	220.9 MPa	O.K
인장강도시험	320 MPa	314.1 MPa	O.K
압축강도시험	320 MPa	65.0 MPa	O.K

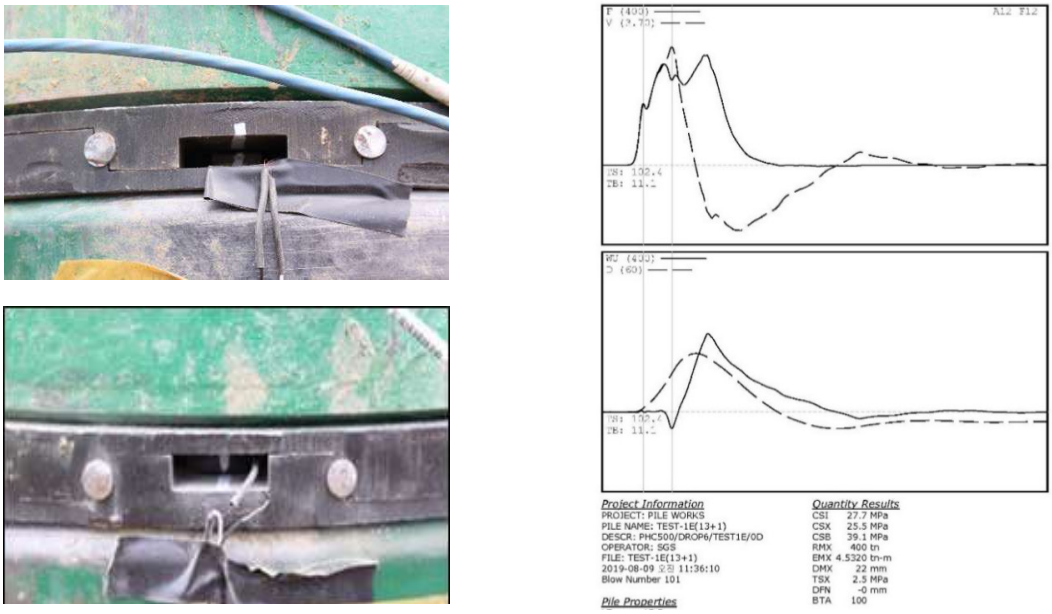
그리고 수평핀 결합방식의 말뚝 이음방법을 매입말뚝에 적용했을 때 압착볼트의 풀림방지 성능과 테이퍼형 수평핀의 핀홀내 고정성능을 검증하고, 이음부에 대한 시공품질을 확인하기 위해 서울시 위례신도시 아파트 건설현장에서 현장시험을 실시하였다. 현장시험은 그림 2-25에서 보듯이 신규방식으로 연결된 직경 500mm PHC말뚝의 이음부를 지상에 노출시킨 상태에서 말뚝 두부에 120kN·m의 타격에너지(중량 60kN 해머를 2.0m 높이에서 낙하)로 100회의 정타격과 5회의 편타격을 실시하면서 압착볼트의 풀림과 테이퍼형 수평핀의 고정상태 변화 여부를 조사하였다. 특히 압착볼트의 풀림 여부는 조인트 상·하판을 말뚝 단부에 부착하기 위해 체결된 압착볼트의 머리와 조인트 상·하판에 연속된 직선을 표시하고 말뚝에 타격이 가해지는 동안 표시한 직선의 엇갈림 정도를 통해 판단하였다. 그리고 테이퍼형 수평핀의 고정상태 이완 여부는 말뚝에 타격이 진행되는 동안 핀홀 외부로 돌출된 수평핀 길이의 변화를 통해 판단하였다.



그림 2-25. 매입말뚝에서 신규 이음방식의 성능평가 시험 전경

시험결과 타격이 종료되었을 때 압착볼트와 조인트 상·하판에 표시한 직선은 그림 2-26(a)와 같이 초기 상태를 그대로 유지하여 항타진동에 의한 압착볼트의 풀림은 발생하

지 않았고, 테이퍼형 수평핀의 돌출길이도 변화가 없어 항타진동에 의해 수평핀이 이탈이나 이완되지 않은 것으로 나타났다. 또한 동재하시험을 통해 말뚝 이음부의 건전도를 측정한 결과 그림 2-26(b)와 같이 BTA값이 100%로 측정되어 신기술에 의한 매입말뚝 이음부는 구조적으로 안정한 것으로 확인되었다.



(a) 상·하부 압착볼트의 풀림여부 (b) 이음부에 대한 건전도시험 결과

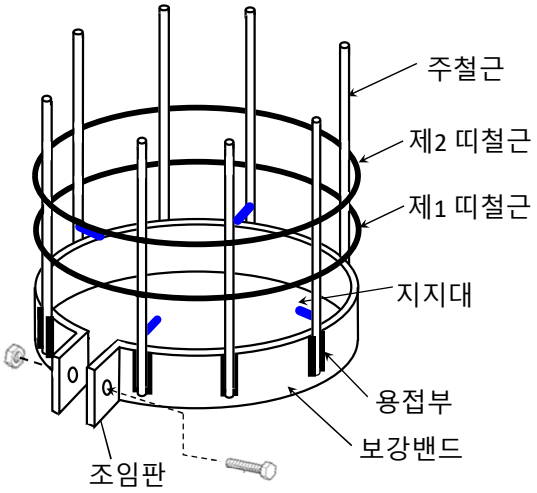
그림 2-26. 매입말뚝에서 신규 이음방식의 적용성 검증시험 결과

(나) 보강밴드형 두부보강재

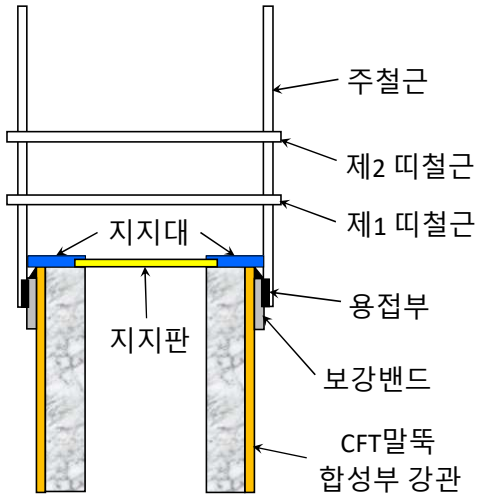
PCFT말뚝의 두부보강과 관련하여 2019년까지는 그림 2-27(a)와 같이 상부 PCFT말뚝의 중공부에 거치대와 연결철근망, 받침판으로 구성되는 두부보강재를 삽입하고 콘크리트를 충전하는 방식을 채택하였다. 그러나 PCFT 복합말뚝을 실용화하는 과정에서 이러한 철근망 삽입방식은 두부보강재와 PCFT말뚝이 강결합상태로 시공되지 않아 두부보강재의 하중저항능력이 우수하지 못할 뿐만 아니라 철근망의 직경이 작아 많은 량의 철근을 사용함으로써 재료비가 상승한다는 문제점이 대두되었다. 그래서 2020년에 수행한 국토교통과학기술진흥원의 기술사업화 과제를 통해 그림 2-27(b)와 같이 단부에 결합된 볼트 체결을 통해 직경을 조절할 수 있는 보강밴드의 외벽에 종방향 철근이 용접된 두부보강재를 PCFT말뚝의 외벽에 결합시킨 후 보강밴드와 PCFT말뚝의 강관을 용접으로 결합함으로써 그림 2-27(c)와 같이 두부보강 철근을 PCFT 복합말뚝에 강결합시킬 수 있는 새로운 방식의 두부보강 방법을 개발하였다.



(a) 철근망 삽입방식



(b) 철근망 보강밴드 방식



(c) 철근망 보강밴드 방식의 두부보강

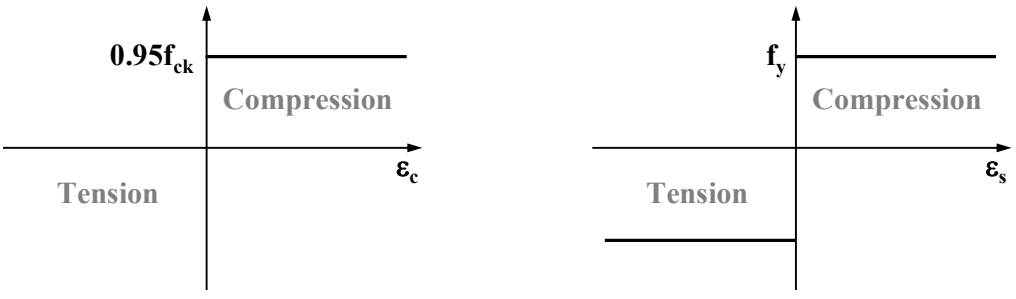
그림 2-27. PCFT 복합말뚝의 두부보강 방법

HCP는 강관 선단에 부착된 연결보강재와 PHC말뚝의 두부를 연결해서 제작된 복합말뚝을 시공한 후 강관말뚝에 적합한 두부보강 작업을 수행하고, ICP말뚝 및 SC합성 복합말뚝은 현장에서 시공이 완료된 PHC말뚝의 중공부에 각각 철근망이나 소구경 강관을 삽입한 후 말뚝 종공부에 콘크리트를 타설하고 별도의 두부보강 작업이 없이 말뚝 시공이 종료된다. 반면 PCFT 복합말뚝의 두부 외주면은 ICP말뚝이나 SC합성 복합말뚝과 달리 강관으로 구성되어 있어 두부보강 철근이 결합된 보강밴드를 상부 PCFT말뚝의 외주면에 용접으로 결합시킴으로써 두부보강을 실시할 수 있다. 이처럼 상부 PCFT말뚝의 외주면에 두부보강

철근이 결합된 보강밴드를 용접으로 결합시키면 ICP말뚝이나 SC합성 복합말뚝과 달리 두부보강 철근을 복합말뚝에 강결합시킬 수 있어 구조물에 작용하는 휨하중 및 인장하중을 말뚝에 안정적으로 전달할 수 있을 뿐만 아니라 휨하중에 대한 철근의 저항거리를 크게 할 수 있어 적은 양의 철근으로도 말뚝과 구조물 바닥기초를 안정적으로 결합시킬 수 있게 된다. 이로 인해 PCFT 복합말뚝은 기존의 ICP말뚝과 SC합성 복합말뚝이 갖고 있던 두부보강 철근의 내력 저하 문제를 해결하였다.

(4) PCFT말뚝의 강도특성 설계기준

PCFT말뚝의 현장 적용을 위해서는 다양한 하중조건에서 말뚝이 구조적으로 안정해야 하며, 이를 설계단계에서 고려하기 위해서는 말뚝의 강도특성을 반영하는 P-M 상관도가 필요하다. 강구조설계기준(KSSC, 2014)에 따르면 축력과 모멘트를 함께 받는 콘크리트 충전형 합성기둥의 P-M상관도는 각 지점의 변형률을 고려해서 응력의 크기를 결정하는 변형률 적합법(strain compatibility method)과 변형률과 무관하게 일정 크기의 소성응력을 작용시키는 소성응력 분포법(plastic stress distribution method)으로 작도가 가능하다. 그리고 두 가지 방법 중 소성응력 분포법이 상대적으로 계산이 더 간단하고 실무에서도 더 많이 사용되고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 PCFT 복합말뚝의 P-M상관도 작도 시 소성응력 분포법을 이용해서 콘크리트 충전 강관(CFT, Concrete Filled steel Tube)말뚝의 구조설계 방법을 제안한 WSDOT(2012)의 설계방법을 적용하였다. 이때 강재와 콘크리트는 그림 2-28과 같이 강소성의 응력-변형률 관계를 갖는다고 가정하였고, 도로교설계기준(KBSS, 2015)에 따라 압축력과 휨모멘트에 대한 하중감소계수로 각각 0.8과 1.0을 적용하였다. 그림에서 f_y는 강재의 항복응력(STP275강재의 경우 235MPa)이고 f_{ck}는 콘크리트의 28일 압축강도(PHC말뚝의 경우 80MPa)을 의미한다.



(a) 콘크리트 (b) PC강봉과 강관

그림 2-28. PCFT 복합말뚝의 구성요소에 대한 응력-변형률 관계

● 말뚝 단면의 가정과 중립축의 위치 정의

PCFT말뚝은 강관과 강관 내부에 합성되는 중공형 콘크리트, 그리고 강관과 합성 콘크리트에 선행응력을 가하기 위해 중공형 콘크리트에 설치되는 다수의 PC강봉으로 구성된다. 이 중 강관 및 합성 콘크리트와 달리 PC강봉은 연속적으로 분포하지 않아 말뚝이 놓이는 상태에 따라 PC강봉의 위치가 달라지므로 한계상태에서 PC강봉이 발휘하는 축력과 휨내력이 달라지게 된다. 따라서 한계상태에서 PC강봉이 발휘하는 축력과 휨내력을 손쉽게 구하기 위해 그림 2-29와 같이 PCFT말뚝에 설치된 다수의 PC강봉은 단면적이 동일하고 반경이 r_b, 두께가 t_b인 PC원형관으로 대체하였다.

한계상태에서 중립축(neutral axis, N.A.)이 PCFT말뚝의 중공부에 접해서 위치할 때 말뚝의 중심을 지나는 수평축으로부터 중립축과 말뚝을 구성하는 강관의 두께 중간지점이 교차하는 지점까지의 각도 α는 그림 2-30과 같이 말뚝 중심으로부터 강관의 두께 중간지점까지의 거리, r_s와 말뚝의 중공부 반경, r_i간의 기하학적인 관계에 의해 식 (2-1)과 같이 정의된다.

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{r_i}{r_s}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{2r_i}{2r_o - t_s}\right) \tag{2-1}$$

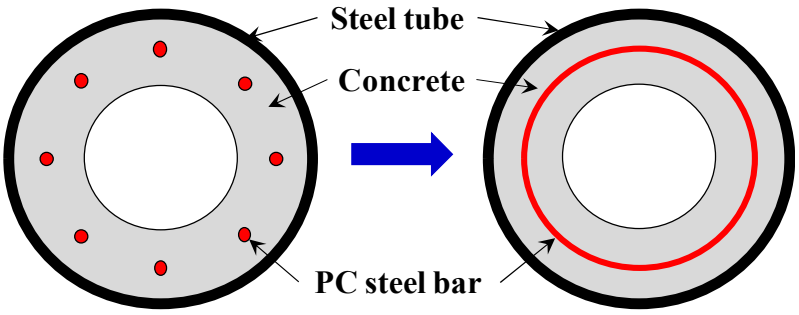


그림 2-29. PCFT말뚝의 PC강봉에 대한 가상단면

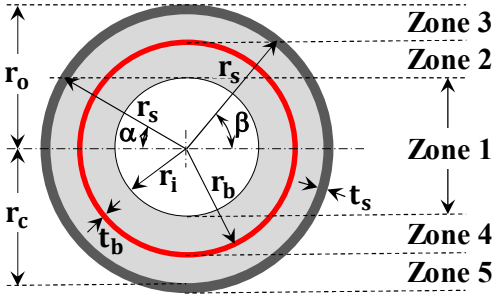


그림 2-30. 중립축의 위치를 정의하는 각도 α와 β

여기서 r_o는 PCFT말뚝의 반경이고 t_s는 PCFT말뚝을 구성하는 강관의 두께이다. 그리고 중립축이 PC원형관의 상부나 하부에 위치할 때 중립축의 위치를 나타내는 각도 β는 r_s와 PC원형관의 반경인 r_b간의 기하학적인 관계에 의해 식 (2-2)와 같이 표시될 수 있다.

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{r_b}{r_s}\right) \tag{2-2}$$

● 말뚝의 구성요소별 극한 축력 산정

그림 2-31과 같이 한계상태에서 PCFT말뚝의 중립축이 말뚝의 중심을 지나는 수평축으로부터 $r_s \sin\psi$만큼 떨어진 곳에 위치할 때 선행응력을 고려한 강관의 압축부와 인장부에 작용하는 축력인 $P_{s(c)}$와 $P_{s(t)}$는 식 (2-3)과 같이 계산된다.

$$P_{s(c)} = 2\int_{\psi}^{\frac{\pi}{2}} (f_{sy} - \sigma_{sp}) r_s t_s \, d\theta = 2(f_{sy} - \sigma_{sp}) r_s t_s \left(\frac{\pi}{2} - \psi\right) \tag{2-3a}$$

$$P_{s(t)} = 2\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi} (-f_{sy} - \sigma_{sp}) r_s t_s \, d\theta = -2(f_{sy} + \sigma_{sp}) r_s t_s \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right) \tag{2-3b}$$

여기서 f_{sy}는 PCFT말뚝을 구성하는 강관의 항복응력이고, σ_{sp}는 강관에 가해진 선행응력, ψ는 말뚝의 중심을 지나는 수평축을 기준으로 r_s를 이용해서 중립축의 위치를 정의하는 회전각이다.

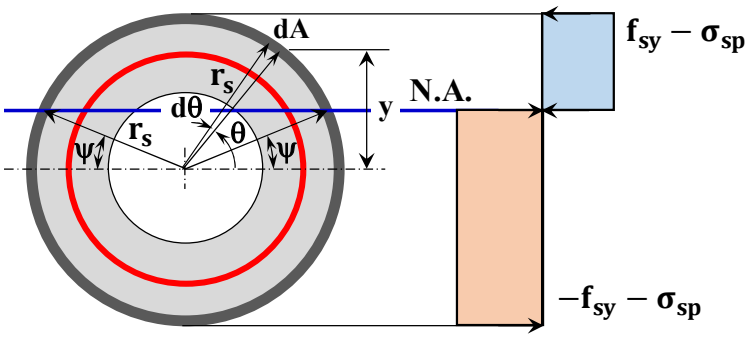


그림 2-31. 강관에 작용하는 응력분포

PCFT말뚝의 중립축이 PC원형관 위, 즉 그림 2-30에서 영역 1, 2, 4에 해당하는 $-\beta \le \psi \le \beta$

의 범위에 위치하면 한계상태에서 PC원형관에 작용하는 응력상태는 그림 2-32와 같고, 이때 PC 강봉이 발휘할 수 있는 압축 및 인장 축력, $P_{b(c)}$와 $P_{b(t)}$는 다음과 같다.

$$P_{b(c)} = 2\int_{\psi_b}^{\frac{\pi}{2}} (f_{by} + \sigma_{bp}) r_b t_b d\theta = 2(f_{by} + \sigma_{bp}) r_b t_b \left(\frac{\pi}{2} - \psi_b\right) \tag{2-4a}$$

$$P_{b(t)} = 2\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi_b} (-f_{by} + \sigma_{bp}) r_b t_b d\theta = -2(f_{by} - \sigma_{bp}) r_b t_b \left(\psi_b + \frac{\pi}{2}\right) \tag{2-4b}$$

여기서 f_{by}는 PC강봉의 항복응력이고 σ_{bp}는 PC강봉에 가해진 선행응력이며, ψ_b는 그림 2-32에서 보듯이 말뚝 중심을 지나는 수평축을 기준으로 r_b의 함수로 중립축의 위치를 나타낸 각도로 식 (2-5)와 같이 표시될 수 있다.

$$\psi_b = \sin^{-1}\left(\frac{r_s}{r_b}\sin\psi\right) \tag{2-5}$$

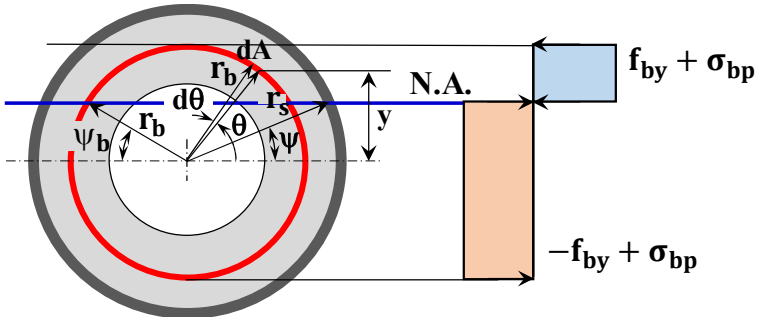


그림 2-32. PC강봉에 작용하는 응력분포

그리고 중립축이 PC원형관을 벗어난 지역 중에서 그림 2-30의 영역 3에 해당하는 $\beta \le \psi \le \pi/2$ 의 범위에 위치하면 모든 PC강봉에 인장력만 작용하므로 $P_{b(c)}$와 $P_{b(t)}$는 식 (2-6)과 같이 산정되고,

$$P_{b(c)} = 0 \tag{2-6a}$$

$$P_{b(t)} = -2\pi (f_{by} - \sigma_{bp}) r_b t_b \tag{2-6b}$$

영역 5에 해당하는 $-\pi/2 \le \psi \le -\beta$ 의 범위에 위치하면 모든 PC강봉에 압축력만 작용하므로

$P_{b(c)}$와 $P_{b(t)}$는 식 (2-7)과 같이 계산된다.

$$P_{b(c)} = 2\pi (f_{by} + \sigma_{bp}) r_b t_b \tag{2-7a}$$

$$P_{b(t)} = 0 \tag{2-7b}$$

한계상태에서 강관 내부에 합성된 중공형 콘크리트에 의해 발휘되는 축력을 구하기 위해서는 계산의 편의성을 위하여 중립축이 말뚝의 중공부에 위치할 때와 중공부를 벗어나서 위치할 때로 구분하여 계산하는 것이 바람직하다. 먼저 중립축이 말뚝의 중공부 위를 지나갈 때, 즉 그림 2-30에서 영역 1에 해당하는 $-\alpha < \psi < \alpha$의 범위에 있을 때 내부 합성 콘크리트 중 압축력을 받는 영역의 면적 A는 그림 2-33과 같이 면적 A_1에서 면적 A_2와 A_3를 제거하는 방법으로 계산할 수 있다. 그리고 이때 내부 합성 콘크리트에는 그림 2-34에 보이는 압축 및 인장응력이 작용하므로 이러한 응력상태를 고려해서 내부 합성 콘크리트에 작용하는 압축 및 인장 축력, $P_{c(c)}$와 $P_{c(t)}$를 산정하면 식 (2-8)과 같이 계산된다.

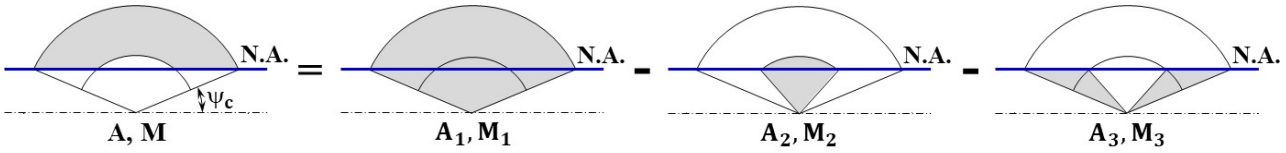


그림 2-33. 중립축이 말뚝 중공부에 위치할 때 PHC말뚝에 작용하는 압축력과 휨모멘트 산정방법

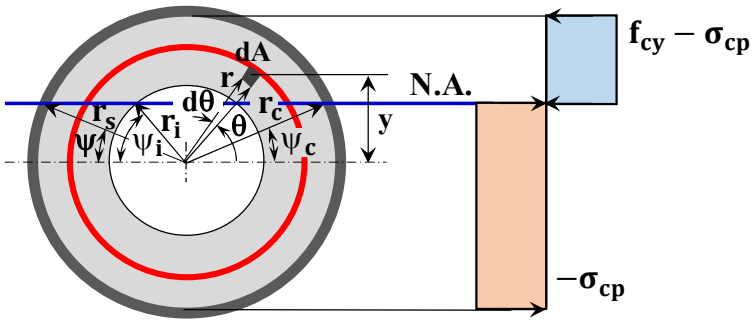


그림 2-34. 내부 합성 PHC말뚝에 작용하는 응력분포

$$P_{c(c)} = 2(f_{cy} - \sigma_{cp}) \left[\int_{\psi_c}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{r_c} r\,dr\,d\theta - \int_{\psi_i}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{r_i} r\,dr\,d\theta - \frac{1}{2} r_c \sin\psi_c (r_c \cos\psi_c - r_i \cos\psi_i) \right]$$

$$= (f_{cy} - \sigma_{cp}) \left[r_c^2 \left(\frac{\pi}{2} - \psi_c \right) - r_i^2 \left(\frac{\pi}{2} - \psi_i \right) - r_c \sin\psi_c (r_c \cos\psi_c - r_i \cos\psi_i) \right] \quad (2\text{-}8a)$$

$$P_{c(t)} = -2\sigma_{cp} \left[\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi_c} \int_0^{r_c} r\,dr\,d\theta + \frac{1}{2} r_c \sin\psi_c (r_c \cos\psi_c - r_i \cos\psi_i) - \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi_i} \int_0^{r_i} r\,dr\,d\theta \right]$$

$$= -\sigma_{cp} \left[r_c^2 \left(\psi_c + \frac{\pi}{2} \right) - r_i^2 \left(\psi_i + \frac{\pi}{2} \right) + r_c \sin\psi_c (r_c \cos\psi_c - r_i \cos\psi_i) \right] \quad (2\text{-}8b)$$

여기서 f_{cy}는 내부 합성 콘트리트의 설계강도, σ_{cp}는 내부 합성 콘크리트에 가해진 선행응력, r_c는 PCFT말뚝을 구성하는 강관의 내부 반경, r_i는 PCFT말뚝 중공부의 반경이며, ψ_c과 ψ_i는 말뚝의 중심을 지나는 수평축으로부터 각각 r_c와 r_i의 함수로 중립축의 위치를 나타내는 각도이다. 따라서 그림 2-34에서 보듯이 ψ_c과 ψ_i는 r_s와 r_c, r_i의 기하학적인 관계로부터 식 (2-9)와 같이 ψ의 함수로 표시할 수 있다.

$$\psi_c = \sin^{-1}\left(\frac{r_s}{r_c} \sin\psi \right) \quad (2\text{-}9a)$$

$$\psi_i = \sin^{-1}\left(\frac{r_s}{r_i} \sin\psi \right) \quad (2\text{-}9b)$$

그리고 중립축이 말뚝의 중공부 위, 즉 그림 2-23에서 영역 2와 3에 해당하는 $\psi \geq \alpha$의 범위에 있을 때 $P_{c(c)}$와 $P_{c(t)}$는 아래와 같이 계산되고,

$$P_{c(c)} = 2(f_{cy} - \sigma_{cp}) \left[\int_{\psi_c}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{r_c} r\,dr\,d\theta - \frac{1}{2} r_c^2 \sin\psi_c \cos\psi_c \right] = (f_{cy} - \sigma_{cp}) r_c^2 \left[\left(\frac{\pi}{2} - \psi_c \right) - \frac{1}{2} \sin 2\psi_c \right] \quad (2\text{-}10a)$$

$$P_{c(t)} = -\sigma_{cp} \left[2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi_c} \int_0^{r_c} r\,dr\,d\theta + r_c^2 \sin\psi_c \cos\psi_c - \int_0^{2\pi} \int_0^{r_i} r\,dr\,d\theta \right]$$

$$= -\sigma_{cp} \left[r_c^2 \left(\psi_c + \frac{\pi}{2} \right) + \frac{1}{2} r_c^2 \sin 2\psi_c - \pi r_i^2 \right] \quad (2\text{-}10b)$$

말뚝의 중공부 아래, 즉 그림 2-30에서 영역 4와 5에 해당하는 $\psi \leq -\alpha$의 범위에 있을 때 $P_{c(c)}$와 $P_{c(t)}$는 아래와 같이 계산된다.

$$P_{c(c)} = 2(f_{cy} - \sigma_{cp})\left[\int_{\psi_c}^{\frac{\pi}{2}}\int_0^{r_c} r\,dr\,d\theta + \frac{1}{2}r_c^2\,|\sin\psi_c\cos\psi_c| - \int_0^{2\pi}\int_0^{r_i} r\,dr\,d\theta\right]$$

$$= (f_{yc} - \sigma_{pc})\left[r_c^2\left(\frac{\pi}{2} - \psi_c\right) + \frac{1}{2}r_c^2\,|\sin 2\psi_c| - \pi r_i^2\right] \quad (2\text{-}11a)$$

$$P_{c(t)} = -\sigma_{cp}\left[2\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi_c}\int_0^{r_c} r\,dr\,d\theta - r_c^2\,|\sin\psi_c\cos\psi_c|\right] = -\sigma_{cp}r_c^2\left[\left(\psi_c + \frac{\pi}{2}\right) - \frac{1}{2}|\sin 2\psi_c|\right] \quad (2\text{-}11b)$$

● 말뚝의 구성요소별 극한 휨내력 산정

한계상태에서 PCFT말뚝이 발휘할 수 있는 압축 및 인장 축력은 모두 말뚝의 중심부에 작용하므로 말뚝의 휨내력은 미소 면적에 작용하는 축력에 말뚝의 중심을 지나는 수평축으로부터 미소면적의 도심까지의 거리를 곱함으로써 계산될 수 있다. 이러한 방법으로 말뚝의 휨내력을 계산하면 말뚝의 중심에 작용하는 축력에 의한 휨력을 별도로 고려하지 않아도 되므로 말뚝의 휨내력을 손쉽게 산정할 수 있다. 따라서 한계상태에서 PCFT말뚝을 구성하는 강관에 작용하는 응력분포가 그림 2-31과 같은 점을 고려하면 압축 및 인장축력에 의해 강관에 발휘되는 휨내력, $M_{s(c)}$와 $M_{s(t)}$는 식 (2-12)와 같이 계산된다.

$$M_{s(c)} = 2\int_{\psi}^{\frac{\pi}{2}}(f_{sy} - \sigma_{sp})(r_s t_s\,d\theta)\,y = 2(f_{sy} - \sigma_{sp})r_s^2 t_s\cos\psi \quad (2\text{-}12a)$$

$$M_{s(t)} = 2\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi}(-f_{sy} - \sigma_{sp})(r_s t_s\,d\theta)\,y = 2(f_{sy} + \sigma_{sp})r_s^2 t_s\cos\psi \quad (2\text{-}12a)$$

여기서 y는 말뚝의 중심을 지나는 수평축으로부터 강관의 미소요소에 대한 도심까지의 거리를 의미하는 것으로 식 (2-13)과 같이 표시될 수 있다.

$$y = r_s\sin\theta \quad (2\text{-}13)$$

PCFT말뚝의 중립축이 PC원형관 위, 즉 그림 2-31에서 영역 1, 2, 4에 해당하는 $-\beta \le \psi \le \beta$의 범위에 위치할 때 한계상태에서 PC강봉에 발휘되는 응력상태는 그림 2-32와 같으며, 이때 PC강봉에 발생하는 압축 및 인장 휨내력인 $M_{b(c)}$와 $M_{b(t)}$은 다음과 같이 계산된다.

$$M_{b(c)} = 2\int_{\psi_b}^{\frac{\pi}{2}} (f_{by} + \sigma_{bp})(r_s t_s d\theta) y = 2(f_{by} + \sigma_{bp}) r_s^2 t_s \cos\psi_b \tag{2-14a}$$

$$M_{b(t)} = 2\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi_b} (-f_{by} + \sigma_{bp})(r_b t_b d\theta) y = 2(f_{by} - \sigma_{bp}) r_b^2 t_b \cos\psi_b \tag{2-14b}$$

그리고 중립축이 PC원형관의 위나 아래, 즉 그림 2-30에서 영역 3에 해당하는 $\beta \le \psi \le \pi/2$ 또는 영역 5에 해당하는 $-\pi/2 \le \psi \le \beta$ 의 범위에 위치하면 모든 PC강봉이 인장이나 압축을 받게 되므로 말뚝의 중심을 지나가는 수평축을 기준으로 작용하는 $M_{b(c)}$ 와 $M_{b(t)}$ 는 아래와 같이 모두 0이 된다.

$$M_{b(c)} = M_{b(t)} = 0 \tag{2-15}$$

한계상태에서 PCFT말뚝을 구성하는 내부 합성 콘크리트에 의한 휨내력은 축력 산정 시와 마찬가지로 중립축이 중공부에 위치할 때와 중공부를 벗어나서 위치할 때로 구분해서 계산하는 것이 바람직하다. 먼저 중립축이 말뚝의 중공부를 지나갈 때, 즉 그림 2-30에서 영역 1에 해당하는 $-\alpha < \psi < \alpha$ 의 범위에 있을 때 내부 합성 PHC말뚝에 의해 발휘되는 압축 및 인장 휨내력, $M_{c(c)}$ 와 $M_{c(t)}$ 는 그림 2-33과 같이 휨내력 M_1에서 휨내력 M_2와 M_3를 공제함으로써 식 (2-16)과 같이 계산된다.

$$M_{c(c)} = 2(f_{cy} - \sigma_{cp})\left[\int_{\psi_c}^{\frac{\pi}{2}}\int_0^{r_c} (r\,dr\,d\theta) y - \int_{\psi_i}^{\frac{\pi}{2}}\int_0^{r_i} (r\,dr\,d\theta) y - \frac{(r_c \sin\psi_c)^2}{3}(r_c\cos\psi_c - r_i\cos\psi_i)\right]$$

$$= \frac{2}{3}(f_{cy} - \sigma_{cp})\left[r_c^3\cos\psi_c - r_i^3\cos\psi_i - (r_c\sin\psi_c)^2(r_c\cos\psi_c - r_i\cos\psi_i)\right] \tag{2-16a}$$

$$M_{c(t)} = -2\sigma_{cp}\left[\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi_c}\int_0^{r_c} (r\,dr\,d\theta) y + \frac{1}{3}(r_c\sin\psi_c)^2(r_c\cos\psi_c - r_i\cos\psi_i) - \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi_i}\int_0^{r_i} (r\,dr\,d\theta) y\right]$$

$$= \frac{2}{3}\sigma_{cp}\left[r_c^3\cos\psi_c - r_i^3\cos\psi_i - (r_c\sin\psi_c)^2(r_c\cos\psi_c - r_i\cos\psi_i)\right] \tag{2-16b}$$

그리고 중립축이 그림 2-30에 보이는 영역 2와 3에 해당하는 $\alpha \le \psi \le \pi/2$ 의 범위나 영역 4와 5에 해당하는 $-\pi/2 \le \psi \le -\alpha$ 에 위치할 경우 $M_{c(c)}$ 와 $M_{c(t)}$ 는 식 (2-17)과 같이 계산된다.

$$M_{c(c)} = 2(f_{cy} - \sigma_{cp})\left[\int_{\psi_c}^{\frac{\pi}{2}}\int_0^{r_c}(r\,dr\,d\theta)\,y - \frac{1}{3}r_c^3\sin^2\psi_c\cos\psi_c\right] = \frac{2}{3}(f_{cy} - \sigma_{cp})\,r_c^3\cos^3\psi_c \quad (2\text{-}17a)$$

$$M_{c(t)} = -2\sigma_{cp}\left[\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi_c}\int_0^{r_c}(r\,dr\,d\theta)\,y + \frac{1}{3}r_c^3\sin^2\psi_c\cos\psi_c - \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\int_0^{r_i}(r\,dr\,d\theta)\,y\right] = \frac{2}{3}\sigma_{cp}\,r_c^3\cos^3\psi_c \quad (2\text{-}17b)$$

● 말뚝의 극한 축력과 휨내력 산정

한계상태에서 PCFT말뚝의 중립축 위치, ψ에 따라 말뚝이 발휘할 수 있는 극한축력은 말뚝을 구성하는 모든 요소들이 발휘할 수 있는 극한축력을 모두 합한 값에 축력에 대한 저항계수 ϕ_P를 곱함으로써 식 (2-18)과 같이 계산된다.

$$P = \phi_P\left(P_{s(c)} + P_{s(t)} + P_{b(c)} + P_{b(t)} + P_{c(c)} + P_{c(t)}\right) \quad (2\text{-}18)$$

그리고 한계상태에서 PCFT말뚝이 발휘할 수 있는 극한휨내력은 말뚝을 구성하는 모든 요소들이 발휘할 수 있는 극한휨내력을 합한 값에 휨내력 저항계수 ϕ_M을 곱한 식 (2-19)와 같이 계산된다.

$$M = \phi_M\left(M_{s(c)} + M_{s(t)} + M_{b(c)} + M_{b(t)} + M_{c(c)} + M_{c(t)}\right) \quad (2\text{-}19)$$

따라서 식 (2-18)과 (2-19)에 PCFT말뚝을 구성하는 재료의 강도특성(f_{sy}와 f_{by}, f_{cy})과 제원(r_s와 r_b, r_c, r_i)을 적용하면 중립축의 위치를 정의하는 각도, ψ에 따라 한계상태에서 PCFT말뚝이 발휘할 수 있는 극한축력 P와 극한휨내력 M을 계산할 수 있다.

도로교설계기준해설(KIBSE, 2015)에서는 비항타말뚝의 경우 축력을 받는 강관말뚝에 대해 한계상태에서 저항계수 ϕ_P로 0.8을 제시하였고, 휨력을 받는 모든 종류의 말뚝에 대한 저항계수 ϕ_M로 1.0을 제시하고 있다. 따라서 PCFT말뚝을 구성하는 3가지 요소 중 강관과 PC강봉의 재질이 강재인 점을 고려해서 식 (2-18)과 (2-19)를 이용해서 PCFT말뚝의 극한축력과 극한휨내력을 산정할 때 사용되는 저항계수 ϕ_P와 ϕ_M로 각각 0.8과 1.0을 적용하였다.

● PCFT말뚝의 P-M 상관도

PCFT말뚝의 구성요소 중 내부 합성 콘크리트를 감싸는 강관은 외경이 500mm이고 두께가 6mm이며, 항복강도 f_{sy}가 275MPa이고 극한강도 f_{su}가 400MPa인 STP 275 강재로 제작되었다. 구조물기초설계기준해설(KGS 2015)에 따르면 일반적인 조건의 지반에서 강관말뚝은

100년 동안 2mm가 부식되므로 현장에 시공된 강관말뚝의 내력 평가 시 이러한 부식공제를 반영하는 것이 필요하다.

PCFT말뚝에 선행응력을 가할 목적으로 설치한 PC강봉은 항복강도 f_{by}와 극한강도 f_{bu}가 각각 1,275MPa과 1,420MPa인 SBPD 1275/1420 강재로 제작(KS D 3505)되고, 직경이 500mm인 PCFT말뚝에는 직경 9.2mm의 PC강봉이 9개 설치된다. 따라서 9개의 PC강봉을 그림 2-29와 같이 단면적이 동일한 PC원형관으로 대체하면 말뚝 중심으로부터 PC원형관 두께의 중간 지점까지 거리 r_b는 210mm이고 PC원형관의 두께 t_s는 0.44mm가 된다.

또한 콘크리트에 대한 설계강도는 일반적으로 $0.85f_{ck}$로 계산되며, 여기서 f_{ck}는 콘크리트의 28일 압축강도를 의미한다. 그러나 PCFT말뚝은 하중을 받으면 강관이 내부 합성 콘크리트의 변형을 구속해서 콘크리트의 압축강도가 커지는 구속효과(confining effect)가 발생하고, 그로 인해 말뚝의 휨, 전단 및 압축내력이 커지는 것으로 보고되었다(Chin et al., 2009; Kang et al., 2011, Paik, 2018). 이러한 구속효과에 의한 PCFT말뚝의 휨내력 증가를 고려하기 위해 WDOT(2012)에서는 강관 내부에 합성된 콘크리트의 설계강도로 $0.95f_{ck}$를 사용할 것을 제안하였다. 따라서 기존의 연구결과를 반영하여 PCFT말뚝의 압축력과 휨내력 산정할 때 콘크리트의 설계강도로 $0.95f_{ck}$를 사용하였고, PCFT말뚝에 사용되는 콘크리트가 고강도임을 고려하여 f_{ck}에 80MPa을 적용하였다. 반면 콘크리트의 인장강도는 0으로 처리하였다. 참고로 직경 500mm PCFT말뚝의 경우 말뚝을 구성하는 강관의 외경은 500mm이고 두께가 6mm이며, 내부 합성 중공형 콘크리트의 외부 반경 r_c와 중공부의 반경 r_i은 각각 244mm와 170mm이다. 표 2-9는 직경이 500mm인 PCFT말뚝에 대해 제안식을 이용해서 P-M상관도의 계산할 때 사용한 PCFT말뚝의 3가지 구성요소별 강도특성과 제원을 정리한 것이다.

표 2-9. P-M 상관도 산정에 사용된 말뚝 구성요소의 강도특성과 제원

구성요소	강도		제원 (mm)	
	기준	크기 (MPa)	외경	두께
강관	f_y	275 or 400	500[1)]	6 [1)]
PC 강봉	f_y	1,275 or 1,420	420	0.44
내부 합성 PHC말뚝	$0.95f_{ck}$	76	488	74

1) 부식을 고려하지 않음

직경이 500mm이고 두께가 6mm인 강관을 사용해서 제작된 PCFT말뚝의 경우에 대해 식 (2-1)과 (2-2)를 이용해서 말뚝의 중공부 크기와 PC원형관의 크기를 정의하는 각도인 α와 β를 계산한 결과 $\alpha = 43.7°$, $\beta = 58.6°$로 결정되었다. 그리고 중립축의 위치(또는 각도 ψ)가 그림 2-23에서 영역 1($-\alpha \leq \psi \leq \alpha$), 영역 2($\alpha \leq \psi \leq \beta$), 영역 3($\beta \leq \psi \leq \pi/2$), 영역 4($-\beta \leq \psi \leq -\alpha$), 영역 5($-\pi/2 \leq \psi \leq -\beta$)에 있을 때 식 (2-3)~(2-17) 중에서 해당 조건에 적합한 수식을 이용해서 P_s, P_b, P_c와 M_s, M_b, M_c을 산정하고 그 결과를 식 (2-18)과 (2-19)에 적용하면 한계상태에서 중립축의 위치(또는 각도 ψ)에 따른 PCFT말뚝의 극한축력과 극한휨내력이 계산된다. 정리하면 PCFT말뚝의 P-M 상관도는 '① 말뚝의 제원과 구성요소의 강도특성 결정, ② 식 (2-3)~(2-11)을 이용한 말뚝 구성요소별 극한축력과 극한휨내력 산정, ③ 식 (2-12)~(2-17)을 이용한 말뚝 구성요소별 극한휨내력 산정, ④ 다양한 ψ에 대해 식 (2-18)과 (2-19)를 이용한 PCFT말뚝의 극한축력과 극한휨내력 산정, ⑤ ④단계에서 계산된 극한축력과 극한휨내력을 이용한 P-M 관계도 작도'의 순서로 그려질 수 있다. 그리고 강관말뚝(steel pipe pile, SP)의 경우에는 식 (2-3)과 (2-12)를 이용하면 한계상태에서 강관말뚝의 극한축력과 극한휨내력을 구할 수 있다.

그림 2-35는 직경이 500mm이고 두께가 6mm인 강관으로 제작한 PCFT말뚝과 직경이 500mm이고 두께가 12mm인 강관말뚝에 대해 식 (2-18)과 (2-19)의 제안식으로부터 얻어진 P-M 상관도와 휨강도시험에서 측정된 시험결과를 함께 나타낸 것이다. 제안식과 휨강도시험의 결과 비교를 통해 제안식의 정확도를 평가하고, P-M 상관도 계산 시 휨강도시험의 시험조건을 반영하기 위해 PCFT말뚝에 사용된 강관과 강관말뚝의 부식에 대한 두께 감소는 고려하지 않았다. 그림에서 보듯이 강관말뚝은 압축 및 인장에 대한 강도특성이 동일하기 때문에 P-M 상관도가 직선의 형태를 보였고 인장부와 압축부의 P-M 상관도가 수평축을 기준으로 대칭을 이루고 있다. 반면 PCFT말뚝은 강관말뚝과 달리 인장에 비해 상대적으로 압축강도가 큰 콘크리트가 강관 내부에 합성된 구조를 갖기 때문에 P-M 상관도가 PHC말뚝과 비슷하게 포물선 형태로 나타났고, 인장보다 압축하중에 더 크게 저항하는 형태를 보였다. 즉 축력이 작용하지 않는 순수 휨하중 상태에서 PCFT말뚝의 최대 휨내력은 612kN·m로 강관말뚝의 최대 휨내력인 686kN·m보다 작았다. 그러나 말뚝에 2,341kN의 압축력이 가해지면 PCFT말뚝의 최대 휨내력은 937kN·m까지 증가하지만 강관말뚝의 최대 휨내력은 231.3kN·m로 감소하는 것으로 나타났다. 참고로 휨하중이 0일 때 한계상태설계법에 따른 PCFT말뚝의 압축과 인장내력은 각각 1,775kN과 7,626kN으로, PHC말뚝의 압축과 인장내력인 558kN과 6,321kN을 크게 상회하였다.

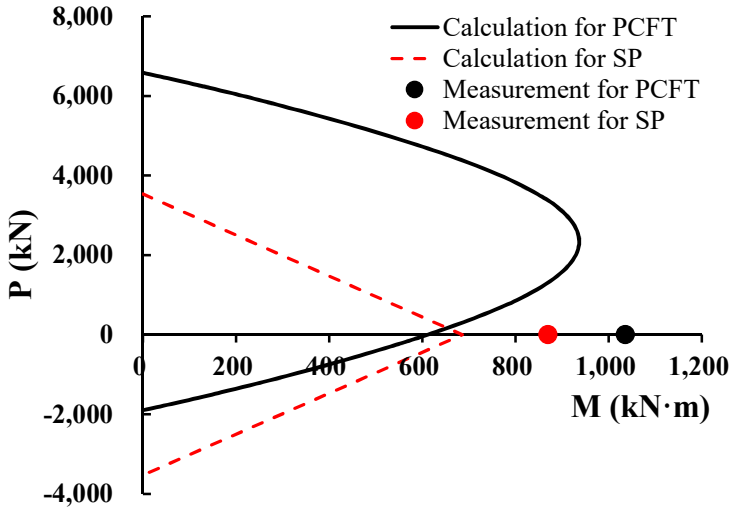


그림 2-35. PCFT말뚝에 대한 계산된 축력 및 휨내력과 휨강도시험 결과의 비교

그림 2-35에서 보듯이 제안식은 압축력이 0인 순수 휨하중 상태에서 강관말뚝이 PCFT말뚝보다 12%의 휨내력을 더 발휘하는 것으로 계산하였으나 실제 휨강도시험에서는 이와 반대로 PCFT말뚝이 강관말뚝보다 18.7% 큰 휨내력을 발휘하는 것으로 측정되었다. 또한 휨강도시험 결과와 비교할 때 제안식은 강관말뚝의 휨내력은 21.0% 그리고 PCFT말뚝의 휨내력은 41.9%나 과소평가하였다. 이처럼 P-M 상관도를 계산하기 위한 제안식이 강관말뚝보다 PCFT말뚝에 대해 휨내력을 더 과소평가하는 것은 휨내력을 계산할 때 PCFT말뚝을 구성하는 내부 합성 콘크리트의 인장강도는 전혀 고려되지 않은 반면, 강관말뚝은 단면의 찌그러짐에 따른 휨내력 감소가 고려되지 않았기 때문으로 판단된다. 따라서 제안된 방법으로 PCFT말뚝의 P-M 상관도를 계산하고 이것을 PCFT 복합말뚝의 설계에 사용하면 안전측에서 말뚝의 구조안전성을 판단할 수 있다.

(5) PCFT 복합말뚝에 대한 구조설계 프로그램

(가) 구조설계 프로그램 개발

PCFT 복합말뚝에 대한 설계를 진행하기 위해서는 그림 2-36에 보이는 바와 같이 먼저 말뚝이 설치된 현장의 지반조건과 시공될 PCFT 복합말뚝의 제원(상·하부말뚝의 직경과 길이, 탄성계수, 단면2차 모멘트)을 결정하고, 기초에 시공될 PCFT 복합말뚝의 수량과 배치를 결정해야 한다. 그리고 한계상태설계법(limit state design)으로 말뚝과 기초가 강결합 또는 힌지 결합되었을 때 기초 중앙부에 작용하는 하중(사용한계 하중과 극한한계 하중, 극단상황 한계 한중)을 계산하고, Matrix 해석을 통해 변위법으로 이들 하중에 의해 기초에 배치된 말뚝에 작용하는 축력과 모멘트, 전단력 그리고 말뚝 두부에서 발생하는 수평변위를 산정한다.

이때 Matrix 해석으로 계산된 말뚝의 수평변위가 허용치인 38mm를 초과하면 기초에 시공되는 말뚝의 수량과 배치를 변경하게 되고, 계산된 수평변위가 허용치를 초과하지 않으면 말뚝의 구조안전성을 검토하는 단계로 이동하게 된다. 이러한 과정을 통해 말뚝의 수평변위에 대한 안전성 검토가 종료되면 Matrix 해석을 통해 계산된 각각의 말뚝에 작용하는 축력과 모멘트, 전단력을 이용해서 말뚝에 작용하는 최대 연직응력과 휨모멘트를 계산하고, 이 값들을 상부 PCFT말뚝과 하부 PHC말뚝에 대한 P-M 상관도에 적용시켜서 말뚝에 작용하는 하중에 대한 PCFT 복합말뚝의 구조안전성을 검토한다. 그리고 마지막으로 PCFT 복합말뚝의 두부보강을 위한 철근량 산출을 위한 설계를 수행하고 말뚝 두부를 결합하는 기초의 펀칭파괴 등에 대한 구조안전성을 검토함으로써 PCFT 복합말뚝에 대한 설계가 종료된다.

PCFT 복합말뚝은 그림 2-36과 같은 흐름도에 따라서 구조해석 및 설계가 진행되고, 도로교 설계기준을 근거로 자체 개발한 엑셀기반 설계프로그램을 사용하여 PCFT 복합말뚝의 구조해석 및 설계가 이루어진다. 본 연구를 통해 개발된 엑셀기반의 설계프로그램을 구동하기 위해서는 그림 2-37에 보이듯이 현장 지반조건과 말뚝 제원, 기초형상 및 말뚝 배치상태, 기초 중앙에 작용하는 하중조건을 입력해야 한다. 그리고 설계프로그램의 구동을 통해 기초에 배치된 모든 말뚝에 작용하는 축력과 휨력, 전단력에 의한 휨응력에 대해 말뚝의 구조 안전성 여부를 그림 2-38과 같이 시각적으로 판단할 수 있도록 하였다.

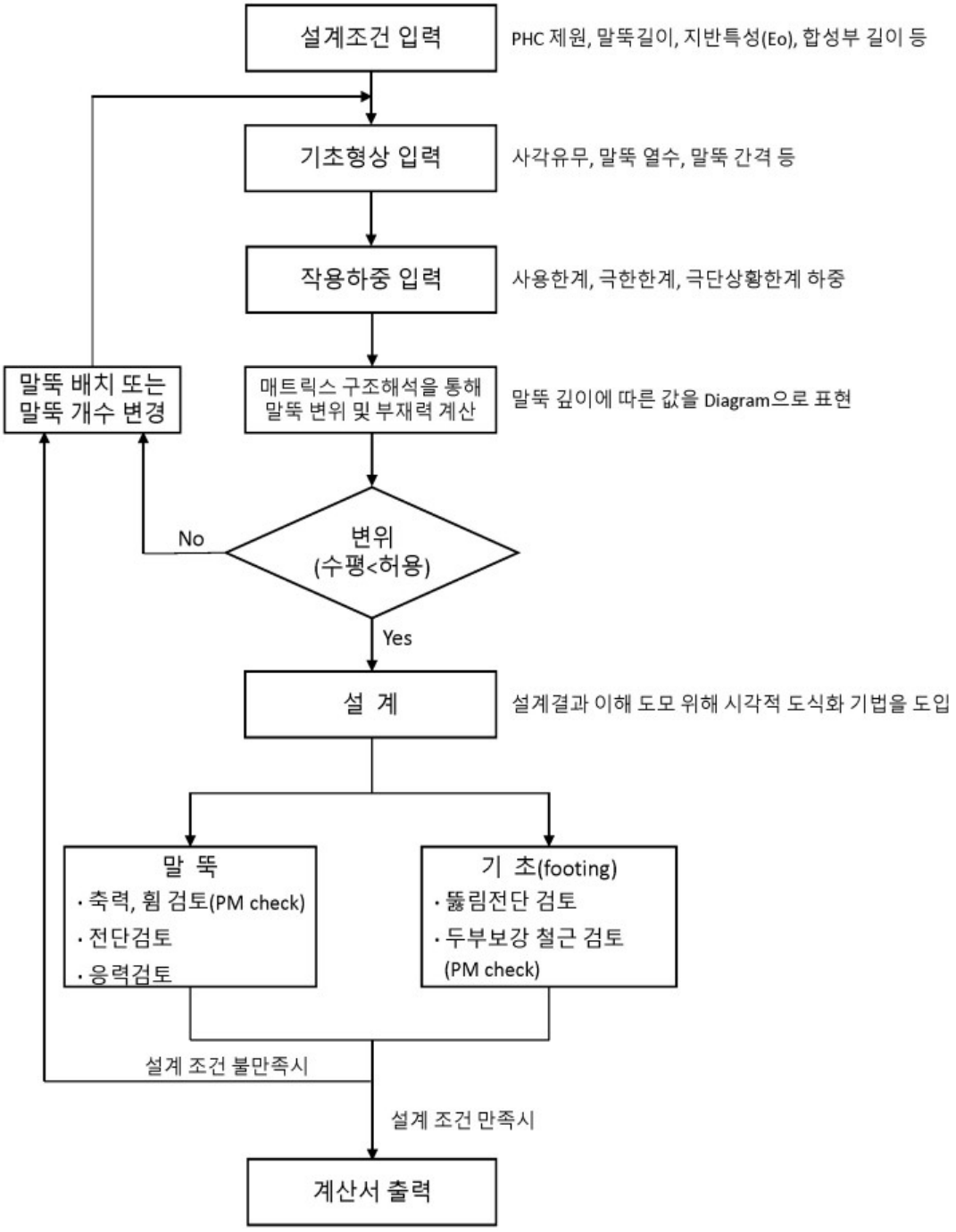


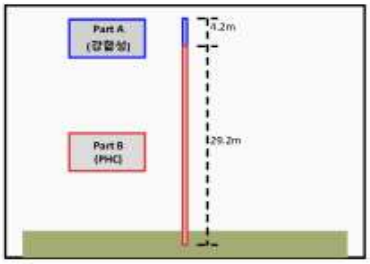
그림 2-36. PCFT 복합말뚝에 대한 설계 흐름도

말뚝검토

1) 설계조건 (말뚝 길이 동일)

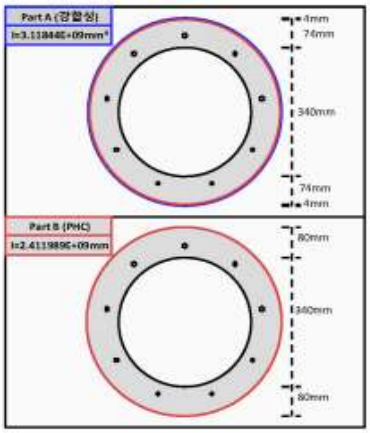
① 지반조건 및 기본가정

구분	적용
말뚝의 시공방법	프리보링 복합말뚝(PCFT)
말뚝 머리의 평균 N치 (N_{H})	15
말뚝 선단의 평균 N치 (N_{e})	40
지반변형계수 (E_0)	1000N
말뚝 선단의 근입깊이 (m)	2.05m
두부의 돌출길이 (m)	0m
말뚝의 총길이 (L, m)	33.4m
합성구간 길이(L_c, m)	4.2m



② 말뚝의 제원

구분		적용
말뚝 (노출환경) (EC2)	말뚝외경(D_{out})	500mm
	유효외경(D_{eff})	496mm
	부식(T_c)	2mm
강관 (SKK400)	f_y(MPa)	235MPa
	두께(T_s)	6mm
	탄성계수(E_s)	205000MPa
콘크리트	f_{ck}(MPa)	80MPa
	두께(T_p)	80mm
	탄성계수(E_p)	38719MPa
강봉 (A) fpe : 4.2MPa	f_y(MPa)	785MPa
	직경(D_t)	9.2mm
	피복(C_t)	45mm
	탄성계수(E_t)	200000MPa
	개수(n_{ten})	9EA

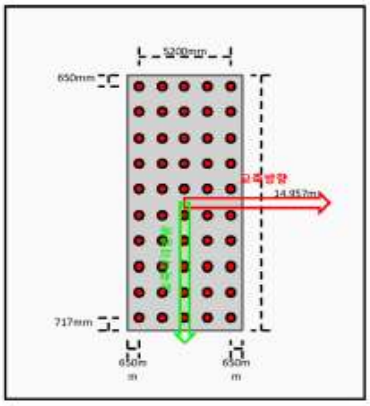


2) 기초 형상

① 말뚝 배치 (사각 : 0), 기초폭: 14.96 m

구분		적용
횡방향	개수(N_L)	5 EA
	간격(S_L)	1,300 mm
	연단(e_{L1})	717 mm
	연단(e_{L2})	650 mm
종방향	개수(N_T)	10 EA
	간격(S_T)	1510 mm
	연단(e_{T1})	650 mm
	연단(e_{T2})	650 mm

간격 입력방법 : ex) 우측부터2000,2500 , 개수 입력방법 : ex)우측부터 7;8;10



② 말뚝 간격검토

말뚝 간격 및 여유거리(+)	적용	판별
· 간격 : Max(750mm, 2.5×Dp)=1250	1300mm	O.K
· 여유거리 : ½Dp+225=475	650mm	O.K

3) 말뚝도심에서의 작용하중

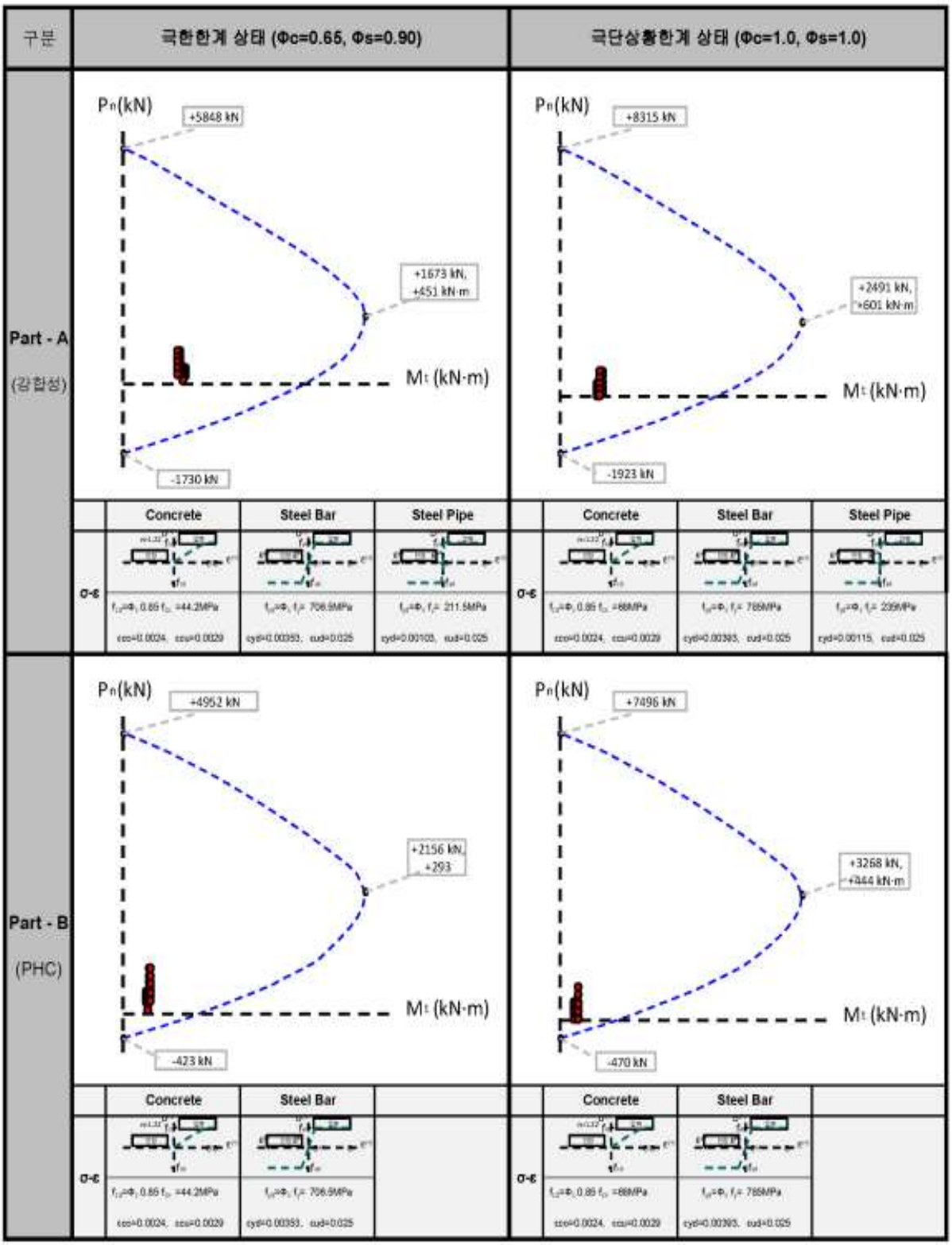
① 교축방향

구분		V_o(kN)	H_o(kN)	M_o(kN·m)	하중조합
사용한계상태	COMBO 1	11695.252	2972.105	-830.362908	I
	COMBO 2	20697.616	3259.654	7016.491911	I
	COMBO 3	11695.252	2539.459	-2432.612463	V
	COMBO 4	17576.913	2683.233	2478.344732	V
극한한계상태	COMBO 1	15205.127	4587.952	364.923046	I
	COMBO 2	11258.367	4587.952	3276.184864	I
	COMBO 3	28369.056	4731.726	10581.65773	I
	COMBO 4	26684.286	4731.726	13902.5132	I
극단상황한계상태	COMBO 1	15205.127	5464.34	7131.20452	I
	COMBO 2	11258.367	5160.44	9108.019088	I
	COMBO 3	24312.141	6644.043	19157.96737	I
	COMBO 4	22627.372	6514.316	21925.9236	I

그림 2-37. 엑셀 기반 설계프로그램의 입력창

ⓑ 말뚝의 단면 검토

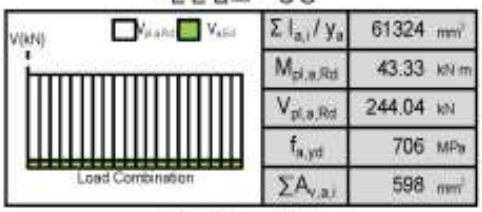
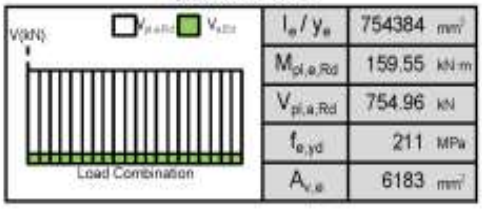
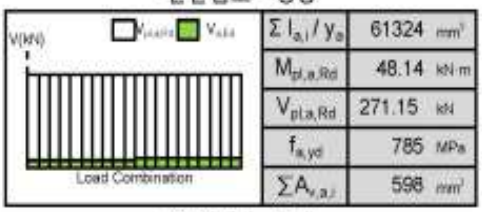
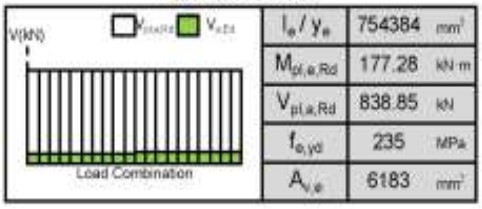
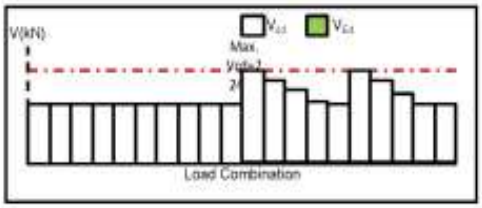
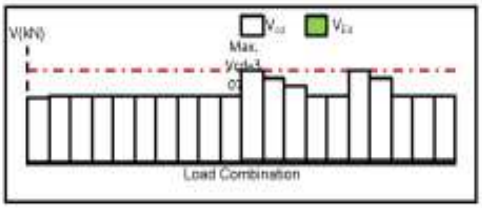
- 축력과 휨 (도로교 설계기준[한계상태설계법], 5.7.1)



(a) P-M 상관도를 이용한 상·하부말뚝의 단면 검토

그림 2-38. 엑셀 기반 설계프로그램의 결과물 출력화면

- 전단 (강합성 : EN1994-1-1, 6.7.3.2. (6.31) , PHC : 도로교 설계기준[한계상태설계법], 5.7.2)

구분	극한한계 상태 (Φc=0.65, Φs=0.90)	극단상황한계 상태 (Φc=1.0, Φs=1.0)
Part - A (강합성)	전단검토 - 강봉  $\Sigma I_{a,i} / y_a$ = 61324 mm³ $M_{pl,a,Rd}$ = 43.33 kN·m $V_{pl,a,Rd}$ = 244.04 kN $f_{a,yd}$ = 706 MPa $\Sigma A_{v,a,i}$ = 598 mm² 전단검토 - 강관  I_e / y_e = 754384 mm³ $M_{pl,e,Rd}$ = 159.55 kN·m $V_{pl,e,Rd}$ = 754.96 kN $f_{e,yd}$ = 211 MPa $A_{v,e}$ = 6183 mm²	전단검토 - 강봉  $\Sigma I_{a,i} / y_a$ = 61324 mm³ $M_{pl,a,Rd}$ = 48.14 kN·m $V_{pl,a,Rd}$ = 271.15 kN $f_{a,yd}$ = 785 MPa $\Sigma A_{v,a,i}$ = 598 mm² 전단검토 - 강관  I_e / y_e = 754384 mm³ $M_{pl,e,Rd}$ = 177.28 kN·m $V_{pl,e,Rd}$ = 838.85 kN $f_{e,yd}$ = 235 MPa $A_{v,e}$ = 6183 mm²
Part - B (PHC)	균열 단면-도로교설계기준 [5.7.2.3 식(5.7.16)] 적용 $V_{cd}=\frac{I \times b_w}{Q}[(\Phi_c \cdot f_{ctk})^2+\alpha_l \cdot f_n \cdot \Phi_c \cdot f_{ctk}]^{\frac{1}{2}}$ where, $I=\pi/4\times[R_o^4-R_i^4]$= 2411989176 mm⁴ $Q=2/3\times[R_o^3-R_i^3]$= 7141333 mm³ $b_w=2\times[R_o-R_i]$= 160 mm α_l= 1 R_o= 250 mm R_i= 170 mm 	균열 단면-도로교설계기준 [5.7.2.3 식(5.7.16)] 적용 $V_{cd}=\frac{I \times b_w}{Q}[(\Phi_c \cdot f_{ctk})^2+\alpha_l \cdot f_n \cdot \Phi_c \cdot f_{ctk}]^{\frac{1}{2}}$ where, $I=\pi/4\times[R_o^4-R_i^4]$= 2411989176 mm⁴ $Q=2/3\times[R_o^3-R_i^3]$= 7141333 mm³ $b_w=2\times[R_o-R_i]$= 160 mm α_l= 1 R_o= 250 mm R_i= 170 mm 

where, $f_{cm} = f_{ck} + \Delta f = 80 + 6 = 86$MPa , $f_{ctm} = 0.3 \cdot (f_{cm})^{2/3} = 0.3 \times (86 \wedge ⅔) = 5.846$MPa

$f_{ctk} = 0.7 \cdot f_{ctm} = 0.7 \times 5.846 = 4.092$MPa , $f_{ctd} = \Phi_c \cdot f_{ctk}$

V_{Ed} : 계수 전단력 [= $V_{c,Ed} + V_{a,Ed} + V_{e,Ed}$] , $V_{c,Ed}$: 콘크리트가 분담하는 계수전단력(미고려)

$V_{a,Ed}$: 강봉이 분담하는 계수전단력 [= $V_{Ed} \times M_{pl,a,Rd} / M_{pl,Rd} = V_{Ed} \times M_{pl,a,Rd} / (M_{pl,a,Rd} + M_{pl,e,Rd})$]

$V_{e,Ed}$: 강관이 분담하는 계수전단력 [= $V_{Ed} \times M_{pl,e,Rd} / M_{pl,Rd} = V_{Ed} \times M_{pl,e,Rd} / (M_{pl,a,Rd} + M_{pl,e,Rd})$]

$M_{pl,a,Rd}$: 강봉의 소성저항모멘트[= $f_{a,yd} \times \sum I_{a,i} / y_e$] , $M_{pl,e,Rd}$: 강관의 소성저항모멘트[= $f_{e,yd} \times I_e / y_e$]

$V_{pl,a,Rd}$: 강봉의 전단저항능력[= $f_{a,yd} \times \sum A_{v,a,i} / \sqrt{3}$] , $V_{pl,e,Rd}$: 강관의 전단저항능력[= $f_{e,yd} \times A_{v,e} / \sqrt{3}$]

만약, 계수전단력 $V_{j,Ed} > 0.5 \times V_{pl,j,Rd}$ 이면 전단저항능력은 $\rho \times V_{pl,j,Rd}$ 이다.

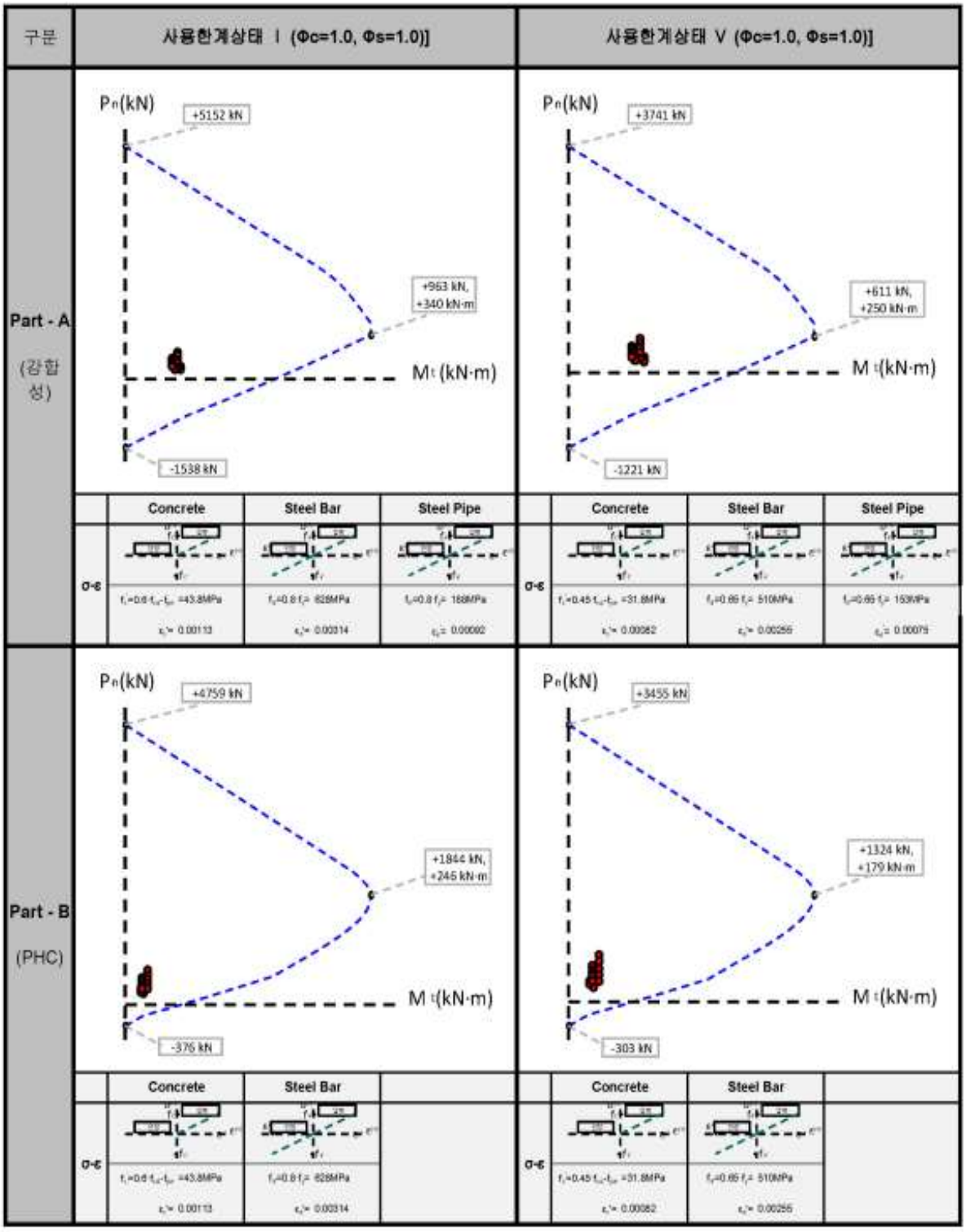
ρ : 전단저항감소계수 [= $(2 \times V_{j,Ed} / V_{pl,j,Ed} - 1)^2$] , j : 더미 인덱스 (=e, a)

(b) 전단하중에 대한 상·하부말뚝의 구조안전성 검토

그림 2-38. 엑셀 기반 설계프로그램의 결과물 출력화면(계속)

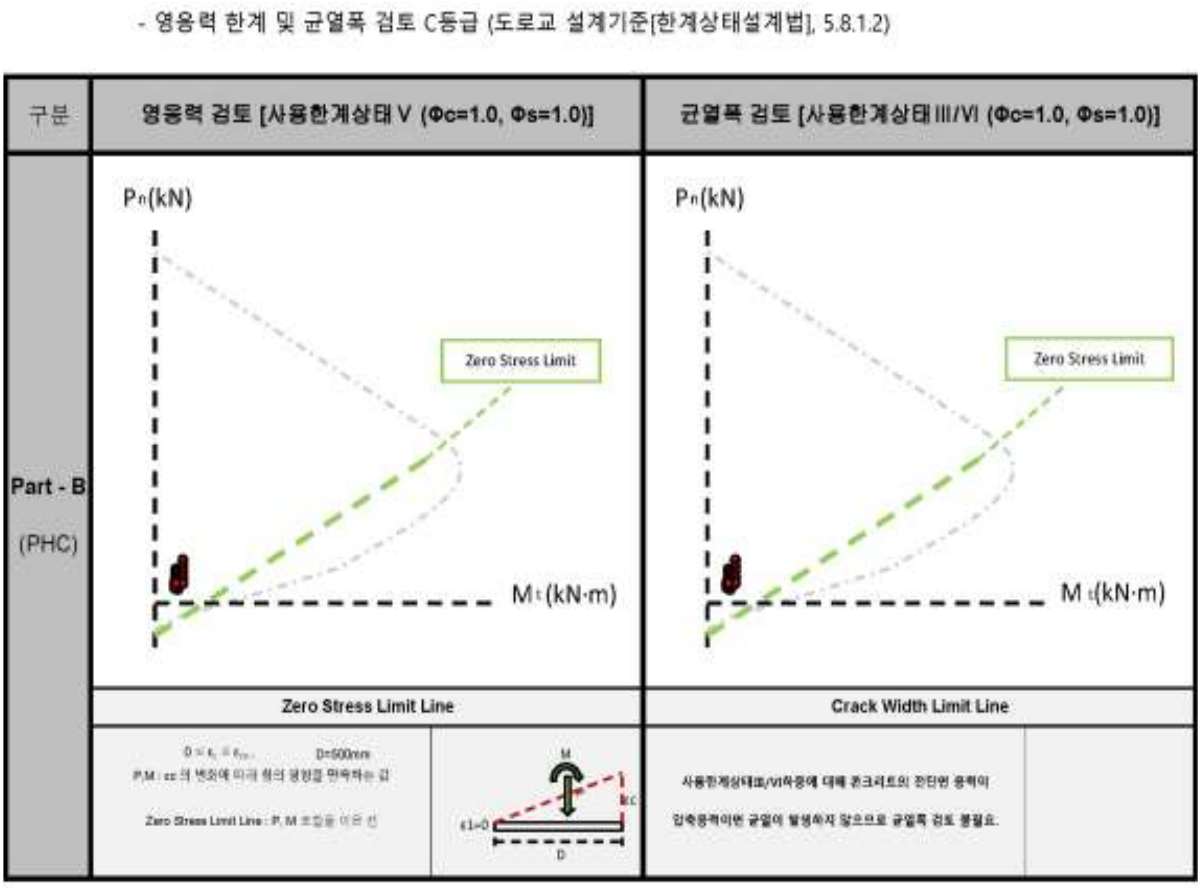
ⓒ 말뚝의 사용성 검토

- 응력 검토 (도로교 설계기준[한계상태설계법], 5.8.2.1)



(c) P-M 상관도를 이용한 상·하부말뚝의 응력 검토

그림 2-38. 엑셀 기반 설계프로그램의 결과물 출력화면(계속)



(d) 영응력 한계 및 균열폭에 대한 안전성 검토

그림 2-38. 엑셀 기반 설계프로그램의 결과물 출력화면(계속)

(나) 구조설계 프로그램에 대한 저작권 등록

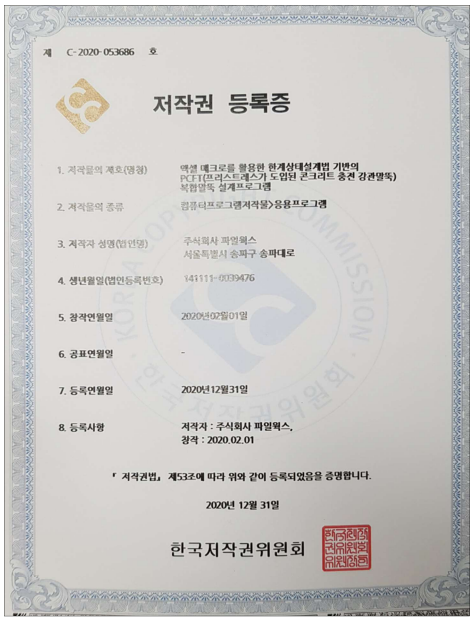
본 연구를 통해 개발된 엑셀 기반의 PCFT 복합말뚝에 대한 구조설계 프로그램에 대한 저작권을 확보하기 위해 그림 2-39에 보이는 바와 같이 2020년 12월 31일에 한국저작권위원회에 해당 프로그램을 '엑셀 매크로를 활용한 한계상태설계법 기반의 PCFT 복합말뚝 설계프로그램(저작권 번호 C-2020-053683호)'로 등록하였다. 따라서 PCFT 복합말뚝에 대한 기술은 총 3건의 국내 등록특허에 의해 보호받고 설계기술은 저작권등록을 통해 보호받음으로써 제3자가 PCFT 복합말뚝 관련 기술을 침해하는 것에 대한 안전장치를 확보하였다.

(6) 기술 검증 및 영업효과 극대화를 위한 신기술 인증

(가) 기술에 대한 검증 및 신기술 인증

PCFT 복합말뚝은 수평하중을 받는 구조물의 기초에 사용되는 것으로, 적용이 가능한 대표 구조물은 교량의 교대이다. PCFT 복합말뚝을 많은 현장에 적용하기 위해서는 국내에서 교량

구조물을 가장 많이 발주하는 한국도로공사와 국가철도공단의 설계에 반영해야 하고, 이를 위해서는 각 기관이 운영하는 기술인증을 통과하는 것이 필요하다. PCFT 복합말뚝 기술은 그림 2-40(a)와 같이 2018년 11월에 한국도로공사에서 운영하는 기술마켓에 등록됨으로써 도로공사 발주 현장에 적용될 수 있는 자격을 충족하였다. 그리고 향후 국토부에서 주관하는 건설신기술 인증을 통과한 이후에 국가철도공단에서 주관하는 기술인증 절차를 밟을 예정이다.



제 C-2020-053686 호

저작권 등록증

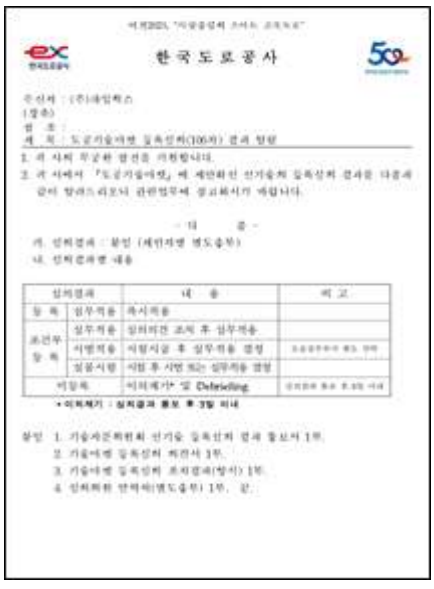
1. 저작물의 제호(명칭)	액셀 매크로를 활용한 한계상태설계법 기반의 PCFT(프리스트레스가 도입된 콘크리트 충전 강관말뚝) 복합말뚝 설계프로그램
2. 저작물의 종류	컴퓨터프로그램저작물>응용프로그램
3. 저작자 성명(법인명)	주식회사 파일웍스 서울특별시 송파구 송파대로
4. 생년월일(법인등록번호)	141111-0039476
5. 창작연월일	2020년02월01일
6. 공표연월일	-
7. 등록연월일	2020년12월31일
8. 등록사항	저작자 : 주식회사 파일웍스, 창작 : 2020.02.01

「저작권법」 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

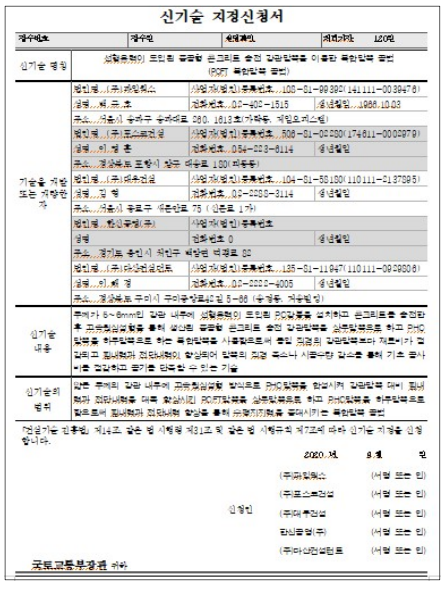
2020년 12월 31일

한국저작권위원회

그림 2-39. 구조해석 프로그램의 저작권 등록증



한국도로공사



신기술 지정신청서

(a) 한국도로공사 기술마켓 등록 공문 (b) 국토부 건설신기술 지정신청서

그림 2-40. 기술에 대한 인증

또한 국토부를 포함한 여러 지방자치단체가 발주하는 공사에 PCFT 복합말뚝을 적용하기 위해서는 국토부에서 주관하는 건설신기술로 지정되는 것이 필요하다. 본 과제를 통해 PCFT 복합말뚝 기술의 품질과 시공성, 경제성 등을 향상시킬 수 있는 다양한 요소기술이 개발되었고, 이러한 요소기술들을 접목함으로써 PCFT 복합말뚝 기술의 완성도를 높이게 되었다. 그 결과 그림 2-40(b)와 같이 PCFT 복합말뚝 기술을 2020년 11월 11일에 '선행응력이 도입된 중공형 콘크리트 충전 강관말뚝을 상부말뚝으로 하고 PHC말뚝을 하부말뚝으로 하는 복합말뚝 공법(PCFT 복합말뚝 공법)'이라는 명칭으로 국토부 건설신기술 지정을 위해 신청했고, 제2366호의 접수번호가 부여되어 담당자가 지정되었다. 그리고 2020년 12월 31일 현재 담당자가 요청한 보완사항에 대해 신청자료를 수정 및 보완하는 단계에 있다.

(나) 향후 마케팅 전략

PCFT 복합말뚝 기술의 현장적용을 극대화하기 위해 2018년부터 지방자치단체와 공공기관, 민간 건설사 및 종합설계사 등을 대상으로 기술홍보를 실시하였다. 표 2-10에 정리된 바와 같이 PCFT 복합말뚝 기술을 서울시와 대구광역시에 신기술로 등록함과 동시에 국내에서 교량을 가장 많이 발주하는 도로공사 설계처와 각종 사업단에서 기술발표회를 가졌고, 철도시설공단의 경우에는 2020년에 온라인 기술홍보를 실시하였다. 또한 현대건설과 대우건설을 포함한 다수의 민간 종합건설사를 대상으로 기술세미나를 실시해 PCFT 복합말뚝 기술을 홍보하였고, 그 결과 대우건설과 포스코건설, 한신공영이 PCFT 복합말뚝의 건설신기술 지정 신청에 참여하였다. 그리고 각종 턴키 프로젝트에 PCFT 복합말뚝을 설계 반영하기 위해 동명엔지니어링을 포함한 다수의 종합설계사를 대상으로 기술영업을 추진하여 철도시설공단에서 발주하는 일부 사업의 기본설계에 PCFT 복합말뚝이 반영되는 성과도 거두었다.

표 2-10. PCFT 복합말뚝 관련 기술 마케팅 실적

기관	기관명
지방자치단체	서울시, 대구광역시
공공기관	한국도로공사, 철도시설공단, 부산항만공사 등
민간 건설사	현대건설, 대우건설, 대림산업, 포스코건설, 롯데건설, 한신공영 등
종합 설계사	동명엔지니어링, 다산컨설턴트, 삼안 등

그리고 기술 마케팅 효과를 높이기 위해 2019년에 과제 수행사의 홈페이지에 PCFT 복합말뚝에 대한 내용을 추가하였고, 동시에 기술의 원리와 성능, 효과, 적용분야 등의 내용을 담은 브로셔도 제작하였다(그림 2-41 참조). 또한 공공기관에서 발주하는 공사에 PCFT 복합말뚝의 적용사례를 높이기 위해 2020년 11월에는 해당 기술의 국토부 건설신기술 지정을 위한 신청서를 국토교통과학기술진흥원에 접수하였다.



(a) 홈페이지

(b) 브로셔

그림 2-41. 홈페이지와 브로셔를 통한 PCFT 복합말뚝 기술 홍보

향후 PCFT 복합말뚝의 현장적용 사례를 더욱 높이기 위해 다음과 같이 5단계에 결쳐 기술 마케딩을 실시함으로써 PCFT 복합말뚝의 현장 시공실적을 증대시킬 계획이다.

- 1단계 : 건설신기술 지정을 통한 기술 검증 완료 및 인지도 제고
- 2단계 : 건설신기술 동반 신청사 주관 현장을 중심으로 PCFT 복합말뚝 적용 및 이를 통한 일정 수량 이상의 시공실적 확보
- 3단계 : 건설신기술 지정을 바탕으로 한국도로공사 및 철도시설공단 발주 프로젝트에 PCFT 복합말뚝 설계 반영
- 4단계 : 공공기관 현장 적용실적을 활용한 민간건설사 주관 현장에 PCFT 복합말뚝 기술 적용
- 5단계 : 각 권역별 및 발주처별 영업망 구축 및 이를 활용한 전국적 기술영업 실시

다. 연구개발 성과

(1) 연구논문

본 연구개발의 목표는 PCFT 복합말뚝 기술의 실용화이며, 이를 위해 PCFT말뚝의 구조성능을 검증하고 최적의 제작방법 도출 및 시공품질과 시공성을 향상시킬 수 있는 요소기술을 개발하였다. 그리고 연구과제를 통해 다양한 방법으로 검증된 PCFT말뚝의 구조성능은 표 2-11에 보이는 총 3편의 연구논문을 통해 학계 및 업계에 보고되었다. 이러한 학술적 성과는 PCFT 복합말뚝 기술에 대한 신뢰도 향상에 기여함으로써 현장적용을 위한 기술영업에 도움이 될 것으로 사료된다.

(2) 특허출원 및 등록

본 연구과제를 수행하면서 원천 기술이 갖고 있는 경제성과 시공성, 생산 효율성 측면의 문제점을 개선할 수 있는 다양한 방안들이 개발되었고, 이들 방안중 일부는 그림 2-42 및 표 2-12와 같이 국내특허로 등록되었다. 또한 요소기술로 개발된 보강밴드 형식의 두부보강 방법 등은 추후 국내특허로 추가 출원할 예정이다.

표 2-11. PCFT 복합말뚝 관련 학술성과

번호	논문명	게재지(권,호)
1	긴장력이 도입된 콘크리트 충전 강관말뚝을 사용한 복합말뚝의 수평거동 특성	한국지반공학회논문집 2018, 제34권, 12호
2	동재하시험을 통한 긴장력이 도입된 콘크리트 충전 강관말뚝을 사용한 복합말뚝의 연직지지력 평가	한국지반환경공학회논문집 2019, 제20권, 3호
3	긴장력이 도입된 중공형 콘크리트 충전 강관말뚝의 휨강도 산정	한국지반공학회논문집 2019, 제35권, 12호

표 2-12. PCFT 복합말뚝 관련 등록특허

번호	특허 등록(출원)번호	특허명	등록여부
1	10-2177051	동재하시험용 콘크리트 충전 강관말뚝 및 이를 이용한 말뚝재하시험 방법	등록


특허증
CERTIFICATE OF PATENT

특 허 제 10-2177051 호
Patent Number

출원번호 제 10-2018-0117367 호
Application Number

출원일 2018년 10월 02일
Filing Date

등록일 2020년 11월 04일
Registration Date

발명의 명칭 Title of the Invention
동재하시험용 콘크리트 충전 강관말뚝 및 이를 이용한 말뚝재하시험 방법

특허권자 Patentee
주식회사 파일럭스(141111-*******)
서울특별시 송파구 송파대로 260, 1613호 (가락동, 제일오피스텔)

발명자 Inventor
한혜와(690811-*******)
서울특별시 강남구 남부순환로 2803, 107동 1302호

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.
This is to certify that, in accordance with the Patent Act, a patent for the invention has been registered at the Korean Intellectual Property Office.

2020년 11월 04일

특허청장
COMMISSIONER,
KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE
김 용 래

특허청
Korean Intellectual Property Office

그림 2-42. PCFT 복합말뚝 관련 등록된 국내 특허 제10-2177051호

(3) 기술인증

한국도로공사와 국가철도공단과 같은 공공기관이 발주하는 현장에 PCFT 복합말뚝 기술의 적용 사례를 높이고 동시에 기술에 대한 객관적인 검증을 위해 표 2-13과 그림 2-40과 같이 2018년 11월에 한국도로공사에서 관리하는 기술마켓의 복합말뚝 분야에 PCFT 복합말뚝을 등록하였고, 국토부 및 지방자치단체에서 발주하는 현장에 대한 적용성 제고를 위해 2020년 11월 11일에 '선행응력이 도입된 중공형 콘크리트 충전 강관말뚝을 상부말뚝으로 하고 PHC말뚝을 하부말뚝으로 하는 복합말뚝 공법(PCFT 복합말뚝 공법)'이라는 명칭으로 국토부 건설신기술 지정을 신청하였다. 2020년 12월 31일 현재 신청기술에 대해 제2366호의 접수번호가 부여되었고, 담당자가 요청한 보완사항에 대해 신청자료를 수정·보완하고 있다.

표 2-13. PCFT 복합말뚝 기술의 기술인증 내역

번호	인증기관/ 명칭	기술명	인증일시
1	한국도로공사/기술마켓	PCFT 복합말뚝 기술	2018년 11월
2	국토교통부/ 건설신기술	선행응력이 도입된 중공형 콘크리트 충전 강관말뚝을 상부말뚝으로 하고 PHC말뚝을 하부말뚝으로 하는 복합말뚝 공법	2020년 11월 접수(제2366호)

(4) 소프트웨어

PCFT 복합말뚝의 실용화를 위해서는 관련 제품 및 시공기술 개발도 중요하지만 그에 못지않게 말뚝의 거동을 실제와 비슷하게 예측할 수 있는 설계기법과 설계프로그램이 필요하다. 본 연구개발을 통해 PCFT 복합말뚝에 대한 엑셀 기반의 구조계산 프로그램을 한계상태설계법으로 개발하였고, 실제 PCFT 복합말뚝의 현장적용을 위한 설계에 활용하고 있다. 개발된 프로그램은 그림 2-39와 같이 2020년 12월 31일에 한국저작권위원회에 '엑셀 매크로를 활용한 한계상태설계법 기반의 PCFT 복합말뚝 설계프로그램'이라는 명칭으로 저작권을 등록(제C-2020-053686호)하였다.

(5) 현장적용

PCFT 복합말뚝은 "부산항(북항) 재개발사업 연결교량(1단계) 건설공사" 현장의 차도교 교대 및 교각 기초에 처음으로 적용되었다. 본 현장에는 표 2-14와 같이 직경 500mm, 길이 33~39m인 PCFT 복합말뚝 294본이 시공되었고, 상부 PCFT말뚝과 하부 PHC말뚝은 그림 2-43에 보이는 바와 같이 수평핀 이음방식으로 연결되었다. 동재하시험을 통하여 PCFT 복합말뚝의 허용지지력은 719.0~796.8kN으로 측정되어 설계지지력(680kN)을 상회하는 것으로 확인되었고, 이음부를 포함한 PCFT 복합말뚝 본체에 대한 BTA가 100%로 측정되어 상·하부말뚝 본체는 물론 수평핀 이음방식으로 연결된 이음부도 구조적인 결함이 없는 것으로 확인되었다. 그리고 PCFT 복합말뚝의 두부보강은 그림 2-27(a)에 보이는 철근망 삽입방식으로 시공되었다.

표 2-14. PCFT 복합말뚝 적용 현장개요

사업명	시공사	파일종류	파일본수	이음방법	착공	완공
부산항(북항) 재개발사업 연결교량(1단계) 건설공사	롯데건설	D500	294	볼트식 이음구	2019.10	2019.12

(6) 인력 고용 및 양성

본 연구개발과제를 수행하면서 총 4명(2018년 2명, 2019년과 2020년 각 1명)의 신규인력을 고용함으로써 취업난 해소에 기여하였고, 위탁기관인 전주대학교에서 박사과정 학생을 연구원으로 참여시켜 3차원 수치해석을 통한 PCFT 복합말뚝의 거동 분석과 PCFT말뚝에



(a) 상부 PCFT말뚝 인양 (b) PHC말뚝에 PCFT말뚝 거치 (c) 상·하부말뚝 연결

그림 2-43. 부산항(북항) 차도교 현장에서 PCFT 복합말뚝 시공 전경

대한 설계기준 개발과 관련한 연구를 수행하면서 박사학위 논문을 준비 중이다. 따라서 본 과제를 통해 최소 1인 이상의 박사학위 인력이 양성될 계획이다.

라. 연구 결과

(1) 기술적 성과

PCFT 복합말뚝은 교대나 옹벽, 도로변 방음벽 또는 지진으로 인해 수평하중을 크게 받는 구조물의 기초에 적용할 수 있다. 이 경우 PCFT 복합말뚝의 휨내력 및 전단내력이 기존 수평하중 지지말뚝보다 큰 폭으로 향상되어 수평지지력이 증대되기 때문에 말뚝의 시공수량을 줄일 수 있고, 그로 인해 기초 공사비를 절감하고 공사기간을 단축시킬 수 있다. 또한 강관말뚝이나 HCP, ICP말뚝에 비해 휨강성에 의한 변형률이 작고 연성 특성이 크기 때문에 수평하중에 의한 구조물의 수평변위를 작게 하는데 기여할 수 있다.

그리고 교량의 경우 기능과 함께 미적인 부분이 강조되면서 경간은 길게 하고 단면은 최소화하는 거더를 개발하려는 연구가 진행되면서 강관 내부에 콘크리트를 충전한 CFT(Concrete Filled steel Tube)거더에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 현재까지 개발된 CFT거더는 현장에서 강관 내부에 콘크리트를 중실형으로 타설하기 때문에 콘크리트의 블리딩 현상으로 인해 압축하중을 받는 강관 상부에 콘크리트가 밀실하게 충전되지 못해 거더의 휨내력이 극대화되지 못할 뿐만 아니라 자중이 무거워 구조적으로도 불리하고 현장 작업이 많아 시공성도 좋지 않다는 문제점을 갖고 있다. 따라서 PCFT말뚝 관련 설계 및 생산기술이 교량 거더에 접목

되면 중공형 콘크리트가 합성된 CFT거더에 대한 최적 설계가 가능하므로 콘크리트의 블리딩 발생 방지에 따른 압축부의 구조성능 저하 방지, 거더의 중량 감소와 선행응력의 도입에 따른 휨내력 향상이 가능해 거더의 단면을 최소화할 수 있고, 현장 작업을 최소화함으로써 고품질의 거더를 생산하는 것도 가능해 고성능 조립식 PCFT거더의 상용화에 기여할 수 있다.

뿐만 아니라 최근 국내에서도 진도가 큰 지진이 발생하면서 구조물에 대한 내진설계 및 내진성능 향상을 위한 보수보강에 관심이 높아지고 있다. 지진에 취약한 구조물의 기초에 PCFT 복합말뚝을 적용하면 구조물의 수평변위 억제와 말뚝의 취성파괴 방지를 통한 구조물의 안정성 향상에 기여할 수 있다. 또한 PCFT 복합말뚝의 상·하부말뚝을 연결하기 위해 개발한 수평핀 결합방식의 이음방법은 현장에서 갑작스런 지지층 심도 변화에 따른 말뚝 길이의 용이한 조절 및 기초조건과 무관한 균일한 품질의 이음시공을 가능하게 한다. 따라서 수평핀 결합방식의 이음방법을 PHC말뚝의 이음에 활용하면 말뚝 이음시공에 대한 작업성이 개선되어 말뚝의 시공성과 품질개선에 도움이 될 수 있다.

또한 무엇보다 본 과제 이전에는 PCFT말뚝에 대한 기본적인 개념과 구조적 성능에 대한 검증결과만 보유하고 있었으나, 본 과제를 통해 PCFT말뚝을 복합말뚝으로 활용할 때 필요한 각종 요소기술이 개발되고 현장시험을 통해 수평지지력의 우수성도 규명됨으로써 PCFT 복합말뚝이 실용화될 수 있는 단계까지 이르렀다. 이러한 PCFT말뚝 기술의 실용화가 본 연구의 가장 큰 성과라고 할 수 있다.

(2) 경제적 성과

PCFT 복합말뚝은 기존의 강관말뚝이나 HCP, ICP말뚝에 비해 휨내력과 전단내력, 압축내력이 향상되기 때문에 동일 지반조건에서도 말뚝의 수평지지력이 큰 폭으로 증가한다. 따라서 일정한 크기의 수평하중을 받는 구조물에 PCFT 복합말뚝을 적용하면 기존의 수평하중 지지말뚝보다 수평지지력이 크게 발현되므로 말뚝의 시공수량을 줄일 수 있고, 그로 인해 기초 공사비를 절감하고 공사기간을 단축시킬 수 있다.

그리고 PCFT 복합말뚝 기술은 온실가스 감축과 철강재의 수입대체 효과로 인한 경제적 이득을 불러올 수 있다. PCFT 복합말뚝은 기존의 PHC말뚝 및 강관말뚝에 비해 수평지지력을 향상시켜 말뚝의 시공수량을 감소시킴에 따라 강관말뚝과 PHC말뚝의 주원료인 철강재와 시멘트의 사용량을 줄여서 철강재의 생산원료인 철광성과 유연탄의 수입량을 감소시켜 수입대체 효과를 가져올 수 있고, 동시에 철강재 및 시멘트 생산과정에서 발생하는 온실가스를 감축함으로써 지구온난화를 억제하고 탄소배출권의 거래를 통해 경제적인 이득을 기대할 수 있다.

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표

본 연구의 최종 목표는 '프리스트레스가 도입된 중공형 콘크리트 충전 강관말뚝을 사용한 복합말뚝 기술의 실용화'이며, 이러한 최종 연구목표를 달성하기 위해 표 3-1과 같이 3개년에 걸친 연도별 사업화 목표를 설정하였다.

표 3-1. 연도별 사업화 목표와 전략 및 방법

구분(연도)	사업화 목표	사업화 전략 및 방법
1차 연도 (2018)	▪ 강도시험과 수치해석을 통한 PCFT말뚝의 최적 제원 결정	▪ 3차원 수치해석을 통한 영향인자에 따른 거동 특성 분석
	▪ 현장시험을 통한 PCFT 복합말뚝의 구조성능 평가	▪ 현장 수평재하시험을 통한 말뚝 종류별 수평지지력 비교
2차 연도 (2019)	▪ PCFT말뚝에 대한 최적 생산방식 결정	▪ 콘크리트 충전 방식별 제작시간 비교
	▪ PCFT말뚝의 강도특성을 반영한 강도 설계기준 구축	▪ 구속효과를 고려한 PCFT말뚝의 P-M 상관도 산정식 개발
	▪ 시공성과 구조안정성이 개선된 볼트식 말뚝이음장치 개발	▪ 강도시험과 3차원 수치해석을 통한 이음장치의 구조성능 검증
3차 연도 (2020)	▪ 사업화 관련 인증 신청	▪ 대형 건설사와 공동으로 국토부 건설신기술 지청 신청
	▪ PCFT 복합말뚝 설계시스템 구축	▪ 엑셀 기반의 구조계산 프로그램 개발
	▪ PCFT 복합말뚝 실용화를 위한 제반 요소기술 개발	▪ 두보정리 및 두부보강 방법 개발 ▪ 기술 영업망 구축

나. 목표 달성여부

본 연구과제는 PCFT 복합말뚝의 구조성능 검증과 제품의 품질 및 생산성 향상, 시공성 개선, 설계시스템 구축을 위해 총 6개의 세부 사업화 목표를 달성하고, 이 과정에서 개발된 다양한 기술을 원천기술에 접목함으로써 PCFT 복합말뚝을 실용화하는 것을 최종 목표로 하고 있다. 본 연구를 통해 PCFT 복합말뚝의 실용화에 필요한 다양한 요소기술을 개발함으

로써 표 3-2와 같이 매출액 달성과 같은 일부 지표를 제외한 대부분의 성과지표를 달성하였다. 그 결과 표 3-3에 보이는 기 설정된 6개의 세부목표를 달성하였고, 이러한 연구실적을 활용해 PCFT 복합말뚝을 실용화함으로써 첫 번째 현장적용을 성공적으로 완료함은 물론 다수의 설계에 반영하여 향후 많은 현장에 적용될 계획이다.

그러나 본 연구과제 제안 당시 검토했던 PCFT말뚝의 구조성능 및 경제성 향상을 위한 고강도 강관 적용과 관련해서 고강도 강관을 사용한 PCFT말뚝에 대해 실내 강도시험과 재료비 비교를 수행한 결과 고강도 강관 사용 시 구조성능 향상보다 재료비 인상율이 더 높아 경제성이 부족하여 고강도 강관 도입에 대한 사항은 PCFT 복합말뚝의 실용화를 위해 필요한 요소기술에서 배제하였다. 또한 PCFT말뚝의 제조에는 반드시 필요하지만 현재까지 국내에서는 생산설비 부재로 인해 조달되지 않고 있는 정사이즈 ERW강관의 조달방법에 대해 조사하였으나 현재 국내 철강재시장이 불황이고 ERW강관을 정사이즈로 제작하기 위해서는 약 10억원의 설비 투자가 필요한 것으로 조사되었다. 이러한 상황을 고려할 때 국내에서 정사이즈 ERW강관을 조달하는 것은 쉽지 않은 것으로 판단되었고, 중국의 제관업체를 중심으로 정사이즈 ERW강관을 국내에 공급할 수 있는 업체를 물색해서 제품의 품질과 가격경쟁력을 검증한 결과 Hunan-스틸이 가격과 품질을 측면에서 경쟁력 있는 것으로 조

표 3-2. 최종 성과지표 및 달성여부

단위성과	성과지표	목표치	검증방법	성취도
PCFT 복합말뚝 제작 및 성능평가	신규인력 고용	4인 채용	4대보험	4명 채용
	특허출원/등록	1건	출원서/등록증	1건 등록
	수평휨내력	휨강도시험 2건	시험성적서	2건 이상 시험
	이음장치 개발	휨 및 인장강도시험	시험성적서	2건 이상 시험
생산 및 설계시스템	최적 생산방법 도출	PHC말뚝 생산효율의 70% 이상	생산효율 측정	생산효율 60%
	정사이즈 ERW강관 수급방안 구축	기준 제원±1% 오차	오차 측정	오차 1% 이내
	설계프로그램 개발	프로그램 등록	저작권 등록증	저작권 등록
실용화 구축방안	건설신기술 인증	신기술 신청	신청서 접수증	신청서 접수
	마케팅 전략수립	영업 계획 수립	RCI평가	전략 수립
	사업화 매출액	2020년까지 30억	세금계산서	약 7억원 달성

표 3-3. 사업화 목표 달성여부와 성과물

구분(연도)	사업화 목표	성과물	가중치	달성 여부
1차 연도 (2018)	▪ 강도시험과 수치해석을 통한 PCFT말뚝의 최적 제원 결정	▪ 3차원 수치해석 보고서	10	달성
	▪ 현장시험을 통한 PCFT 복합말뚝의 구조성능 평가	▪ 수평재하시험 보고서	10	달성
2차 연도 (2019)	▪ PCFT말뚝에 대한 최적 생산 방식 결정	▪ 생산 시스템 구축	15	달성
	▪ PCFT말뚝의 강도특성을 반영한 강도설계기준 구축	▪ PCFT말뚝의 P-M상관도 작도	10	달성
	▪ 시공성과 구조안정성이 개선된 볼트식 말뚝이음장치 개발	▪ 이음장치 성능 시험성적서 ▪ 3차원 수치해석 보고서	10	달성
3차 연도 (2020)	▪ 사업화 관련 인증 신청	▪ 도로공사 기술마켓 등록 공문 ▪ 건설신기술 지정 신청서	20	달성
	▪ PCFT 복합말뚝 설계시스템 구축	▪ 설계프로그램 저작원 등록증	15	달성
	▪ PCFT 복합말뚝 실용화를 위한 제반 요소기술 개발	▪ 두부보강재 시제품 제작 ▪ 브로셔 제작/매출 7억 달성	10	달성

사되었다. 따라서 2019년부터 PCFT말뚝의 생산에 필요한 모든 정사이즈 ERW강관은 중국에 위치한 Hunan-스틸을 통해 조달하고 있다.

반면 위에 언급한 고강도 강관 적용성 검토와 정사이즈 ERW 강관 조달방법에 대한 검토를 대체해서 본 연구과제에서는 수평핀 결합방식의 이음방법과 보강밴드 방식의 두부보강재를 개발하는 연구내용을 추가로 진행하였다. 그리고 이러한 두 가지 추가된 요소기술은 성공적으로 개발되어 PCFT 복합말뚝의 실용화에 크게 기여하게 되었다.

다. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

본 과업을 통해 단기 하중을 가하는 휨강도시험을 통해 PCFT말뚝의 합성부를 구성하는 강관과 내부 합성 콘크리트가 합성으로 거동하는 것은 확인하였으나, 반복하중이나 피로하중과 같은 장기하중을 받았을 때 강관과 내부 합성 콘크리트의 합성 여부는 검증되지 않았다. 또한 모든 말뚝은 단말뚝이 아닌 군말뚝 형태로 시공되므로 군말뚝으로 있을 때 PCFT 복합말뚝의 수평거동을 분석하고, 이때 기존의 HCP나 ICP말뚝과 수평거동 및 경제성 비교 등도 필요

하나 이 부분에 대한 연구는 본 과제에서 수행되지 않았다. 따라서 향후 장기하중 작용 시 합성부를 구성하는 강관과 콘크리트의 합성 여부를 규명하고, PCFT 복합말뚝과 HCP 및 ICP말뚝이 군말뚝으로 시공되었을 때 말뚝 종류별로 수평거동을 비교·분석하고 경제성을 비교하는 연구가 추가로 수행되어야 한다.

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

교량의 경우 기능과 함께 미적인 부분이 강조되면서 경간은 길게 하고 단면은 최소화하는 거더를 개발하려는 연구가 진행되면서 강관 내부에 콘크리트를 충전한 CFT(Concrete Filled steel Tube)거더에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 현재까지 개발된 CFT거더는 현장에서 강관 내부에 콘크리트를 중실형으로 타설하기 때문에 콘크리트의 블리딩 현상으로 인해 압축하중을 받는 강관 상부에 콘크리트가 밀실하게 충전되지 못해 거더의 휨내력이 극대화되지 못할 뿐만 아니라 자중이 무거워 구조적으로도 불리하고 현장 작업이 많아 시공성도 좋지 않다는 문제점을 갖고 있다. 만약 PCFT말뚝 관련 설계 및 생산기술이 교량 거더에 접목되면 원심성형방식으로 강관 내부에 중공형의 콘크리트를 합성함은 물론 최적 단면에 대한 설계도 가능하므로 콘크리트의 블리딩 발생 방지에 따른 압축부의 구조성능 저하 방지, 거더의 중량 감소와 선행응력의 도입에 따른 휨내력 향상이 가능해 거더의 단면을 최소화할 수 있고, 현장 작업을 최소화함으로써 고품질의 거더를 개발하는데 기여할 수 있을 것이다.

또한 최근 많은 구조물들이 초고층화되고 공장이나 물류창공 등은 기둥간 간격이 넓어지면서 기둥 부재에 큰 하중이 작용하게 되었고, 이러한 하중을 지지하면서도 기둥 단면을 최소화하기 위해 CFT기둥을 개발해서 현장에 적용하고 있다. 그러나 대부분의 CFT기둥이 현장에서 시공되면서 시공성과 시공품질을 극대화하지 못하고 있다. 따라서 본 연구과제의 결과를 CFT기둥 분야에 활용하면 구조적으로는 CFT기둥의 최적설계에 도움이 될 수 있고, 공장생산을 통한 균일한 품질확보와 시공성 개선에 큰 도움이 될 수 있을 것이다.

현재 본 연구과제 수행기관은 PCFT 복합말뚝 기술을 사업화하여 말뚝을 제작하고 현장조건에 최적화된 설계를 수행함은 물론 현장에 말뚝을 공급하고 시공을 관리하는 공정까지 지원하고 있다. 이러한 사업분야에 대한 기술홍보를 통해 다수의 현장에 PCFT 복합말뚝 기술을 적용하기 위한 설계를 진행 또는 완료하였으며, 이러한 기술영업으로 인해 향후 보다 여러 현장에 PCFT 복합말뚝 기술이 적용될 것으로 기대하고 있다.

붙임. 참고문헌

1. Bang, J.W., Hyun, J.H., Lee, B.Y., Lee, S.S. and Kim, Y.Y. (2013), “Flexural strength of PHC pile reinforced with infilled concrete, transverse and longitudinal reinforcements”, *Journal of the Korea Concrete Institute,* Vol. 25, No. 1, pp. 91-98.

2. Chin, W. J., Kang, J. Y., Choi, E. S., and Lee, J. W. (2009), “A study on the flexural behavior of concrete filled steel tube girder in parametrically varied filling and composition”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.29, No.2A, pp.109-118.

3. Kang, H. K., Lee, C. H., and Rha, C. S. (2011), “Flexural strength on concrete-filled steel tubular members subjected to pure bending moment”, *Journal of Architecture Institute of Korea*, Vol.27, No.4, pp.11-21.

4. KIBSE (2015), *Korea highway bridge design code(Limit state design) commentary,* Korean Institute of Bridge and Structural Engineers.

5. KS F 4306 (2014), *Pre-tensioned spun high strength concrete piles*, 53p.

6. KSSC (2018), *Korean steel structure design code and commentary(load and resistance factor design),* Korean Society of Steel Construction, 463p.

7. Paik, K. H. (2018), “Strength characteristics of hollow prestressed concrete filled steel tube piles for hybrid composite piles”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 34, No. 1, pp. 37-46.

8. Piletech, Doosan Heavy Industries & Const., Hanmac Esng. and Korea Eng. Consultants (2008), *Design and construction methods of bored hybrid composite pile that joins steel pipe and PHC piles using coupler*, New Excellent Technology No. 556.

9. WSDOT (2012), *Structural design recommendations of CFT and RCFT for bridge foundation*, Washington State DOT Design Memorandum, 30p

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술사업화지원사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술사업화지원사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.