

## 무소음·무진동 스크류 PHC 말뚝의 응력평가를 위한 유한요소해석 FE Analysis for a Stress Evaluation of a Noise & Vibration-Free Screw PHC Pile

정호영<sup>1)</sup>, Ho-young Jung, 최영휴<sup>2)</sup>, Younghu Choi, 오승률<sup>3)</sup>, Seung-ryul Oh, 김성수<sup>4)</sup>, Sung-su Kim, 최용규<sup>5)</sup>, Yongkyu Choi

<sup>1)</sup> 경성대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering Kyungsoong University

<sup>2)</sup> 창원대학교 기계설계공학과 교수, Professor, Dept. of Mechanical Design & Manufacturing Engineering, Changwon National University

<sup>3)</sup> 무성토건 과장, Department Head, Musung Construction Industrial Co, LTD

<sup>4)</sup> 무성토건 상무, Managing Director, Musung Construction Industrial Co, LTD

<sup>5)</sup> 경성대학교 환경건설공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environ. Engineering, Kyungsoong University

**SYNOPSIS** : A FE analysis of a noise & vibration-free screw PHC pile constructed into an in-situ site were performed. During constructing a screw PHC pile, the component stresses, maximum stresses of pile connecting parts and relative displacements of pile were analyzed.

**Keywords** : low noise & vibration pile methods, popular complints, screw pile method, noise & vibration-free screw PHC pile method

### 1. 서 론

현재 PHC 말뚝의 시공법은 타입공법과 매입공법으로 구분할 수 있다. 타입공법에서는 말뚝을 타격을 하여 지중에 관입시키게 되므로 타격시 소음과 진동이 발생하여 도심지에서는 민원을 야기시킬 수 있다. 매입공법에는 SIP공법, PRD공법, SDA공법, SAIP공법 등이 있다. 매입공법도 선천공을 하고 기성말뚝을 넣고 마지막으로 경타를 하기 때문에 소음과 진동이 발생한다.

스크류 말뚝공법은 스크류형 기성말뚝을 천공용 오거에 장착하여 회전 압입하므로 무소음·무진동 공법으로 사용될 수 있다. 스크류 PHC말뚝의 선단에는 말뚝 본체 보호와 천공작업의 효율을 고려하여 원형 선단슈를 장착하여 천공하며, 천공심도가 깊을 경우 기성말뚝을 용접으로 이음하여 사용하므로 천공 깊이에 제약을 받지 않는다. 천공시 천공으로 인한 말뚝 본체와 스크류 사이의 빈 공간을 그라우팅할 수 있다. 즉 말뚝내부에서 오거에 연결된 그라우트 호스를 통하여 가압 주입하여 말뚝선단에 설치된 분사구를 통하여 그라우트로 충전시킬 수 있으므로 말뚝의 선단지지력과 주변마찰력을 극대화할 수 있는 장점이 있다. 국제적으로도 스크류형 기성말뚝의 시공사례는 없으며 현재의 기술수준으로는 신뢰성 있는 설계지침을 제시하지 못하고 있다.

본 연구에서는 무소음·무진동 스크류 PHC말뚝을 천공용 오거로 지중에 회전·압입할 때 말뚝에 발생하는 말뚝부재 응력에 대한 유한요소 해석을 수행하였으며 깊이별 부재응력, 말뚝의 이음부의 최대응력, 말뚝의 변위 등을 분석하였다.

## 2. PHC말뚝

### 2.1 개요

구조물의 규모와 하중이 커지고 부지의 지반 조건이 열악해지면서 PHC말뚝을 더욱 깊게 그리고 단단한 지층에 관입할 필요성이 커졌다. 따라서 말뚝재료의 고강도화가 요구되었으며 콘크리트강도를 80.0MPa 이상으로 증가시키게 되었다.

일본에서는 PHC말뚝이 기성콘크리트말뚝 사용량의 90%이상을 차지하고 있다. 이는 PC말뚝보다 훨씬 큰 압축강도를 가지고 있어 관입성이 개선되었고 말뚝의 양단에 강재가 부착되어 콘크리트파일의 단점인 이음시공이 가능해졌기 때문이다.

우리나라에서는 1988년 PHC말뚝에 관한 규정이 제정된 후, 1992년에 PHC말뚝을 제작하기 시작하였으며 사용량이 급격하게 증가하게 되었으며 PC말뚝을 거의 전면적으로 대체하게 되었다.

PHC말뚝의 콘크리트 설계기준강도는 80.0MPa로 기존 PC파일의 설계 기준 강도인 50.0MPa보다 크게 되어 기존 기성 콘크리트말뚝에 비해 설계지지력을 크게 할 수 있다. PHC말뚝은 상압열기 양생한 PC콘크리트말뚝에 비해 타격력에 대한 저항력이 크며, 고온 고압 증기 양생을 하므로 양생 1일 동안 필요한 강도를 얻을 수 있기 때문에 작업공정을 맞추는데 용이할 뿐만 아니라 경제적이다. 또한 PHC말뚝에서는 크랙이나 건조수축이 PC콘크리트말뚝에 비해 현저히 적다. 또한 PHC말뚝은 PC말뚝에 비해 수평방향의 힘에 의해 발생하는 힘에 대한 저항력이 크며 내약품성, 내부식성이 뛰어나다. 그러나 강관말뚝에 비해 중간층이 단단한 경우 설계깊이까지 관입이 곤란할 수 있고, 수평방향의 저항력이 약하며, 진동에 대한 저항력이 약한 단점이 있다.

### 2.2 PHC말뚝 기초의 설계

#### 2.2.1 지지력

##### (1) 개요

말뚝의 허용지지력은 지반의 지지력과 재료의 강도 중 작은 값으로 결정된다. 따라서 PC말뚝의 압축강도가 50MPa이상이고 PHC말뚝의 압축강도가 80MPa이상이므로 PHC말뚝은 충분한 강도의 지지층까지 도달되지만 한다면 PC말뚝보다 60%만큼 더 큰 지지력을 갖는다. 그러나 재료의 강도가 모두 지지력에 반영된다고는 볼 수 없으며 소요깊이까지의 관입에는 또 다른 문제가 있을 수 있다.

##### (2) 재료의 지지력

말뚝재료의 지지능력을 판단할 수 있는 지표로서 허용응력을 들 수 있다. 허용응력은 압축강도와 연관이 되지만 안전 등의 관점에 따라 기관마다 다소 차이를 보이고 있다. 기관별 허용응력의 기준은 표 1과 같다.

표 1. 기관별 말뚝 허용응력 기준 (이용화, 2008)

말뚝종류	콘크리트 압축강도 (MPa)	허용응력 (MPa)	
		건설교통부	토목공학회
PC말뚝	50.0	12.5	10.5
PHC말뚝	80.0	20.0	10.5

이상에서 알 수 있는 바와 같이 기성콘크리트말뚝의 콘크리트 허용응력은 기관마다 다소 차이를 보이고 있으나 대략 PHC말뚝은 PC말뚝보다 50~60%정도 크게 제시되어 있다.

(3) 지반의 지지력

현재 국내에서는 PHC말뚝의 지지력을 PC말뚝보다 50%정도 크게 하여 설계하고 있다. 이는 PHC말뚝의 장점을 최소한으로 활용하는 것이라고 볼 수 있다. 반면에 일본의 설계 사례에서는 직경 350mm인 경우 재료의 허용지지력으로 PC말뚝(A~C종)은 700kN, PHC말뚝(A종)은 1050kN으로 보고 있으며, 지반에서의 허용지지력으로 PC말뚝(A종)은 450kN, PHC말뚝(A종)은 800kN까지 설계하고 있다. 이는 PHC말뚝의 지지력을 PC말뚝보다 78%까지 크게 하여 설계하고 있음을 보여주는 것이다. 따라서 향후 기술 및 경험의 축적을 통하여 PHC말뚝의 장점을 최대한으로 활용하는 것이 필요하다.

(4) 종합적인 지지력 평가

현행 PHC말뚝의 지지력 평가는 안전측으로 볼 수 있다. 그러나 PHC말뚝이 장점을 최대한 활용하는 것이 경제성 확보에 커다란 영향을 미친다는 점을 감안하면 현행 기준을 보다 상향조정할 수 있는 가능성을 마련해야 한다. 이를 위하여 지속적인 자료 및 경험의 축적이 필요할 것으로 사료 된다.

PHC말뚝은 말뚝선단부에 강관을 부착하여 콘크리트 말뚝의 이음시공이 가능하게 하였으므로, PC말뚝보다 큰 압축강도를 나타낸다. 그 특징은 다음과 같다(이용화, 2008).

- 가. 지지력 : PHC말뚝의 콘크리트 허용압축응력이 크므로 PC말뚝보다 큰 축방향 하중에 저항한다.
- 나. 타격 저항력 : PHC말뚝은 압축강도가 80.0MPa인 콘크리트로 성형한 단면에 프리스트레스 (prestress)를 균일하게 도입하여 타격에 대한 저항력이 우수하고, 항타시 발생하는 반사파에 의한 인장응력을 흡수하기 때문에 PC말뚝보다 균열이 적다. 또한 PC말뚝으로는 항타가 어려운 단단한 중간 지층도 용이하게 관입할 수 있다.
- 다. 휨내력 : 콘크리트의 휨인장응력이 크기 때문에 축력과 수평력을 동시에 받는 내진설계에 유용하다.

**2.2.2 강도**

(1) 휨 강도

표 2. 균열 휨 모멘트 및 파괴 휨 모멘트(KS F 4306, 2003)

바깥 지름 mm	종류	균열 휨 모멘트 kN·m	파괴 휨 모멘트 kN·m	바깥 지름 mm	종류	균열 휨 모멘트 kN·m	파괴 휨 모멘트 kN·m
500	A	103.0	155.0	600	A	166.8	250.2
	B	147.2	264.9		B	245.2	441.4
	C	166.8	333.5		C	284.5	569.0

(2) 축력 휨 강도

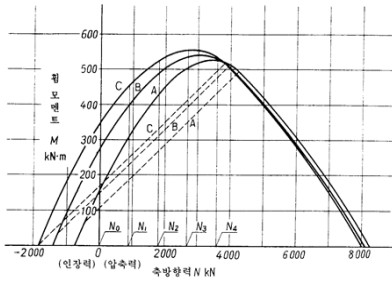


그림 4. 바깥지름 500mm 축력 휨 관계도

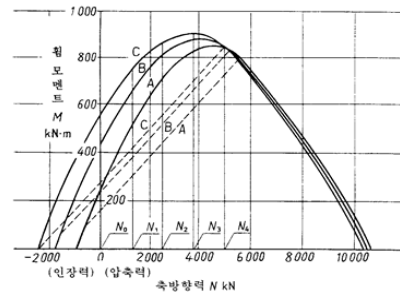


그림 5. 바깥지름 600mm 축력 휨 관계도

(3) 이음부의 휨 강도

이음부의 휨 강도는 표 2에 규정한 몸체의 휨 강도 중 파괴 휨 모멘트와 같거나 그 이상이어야 한다.

(4) 전단 강도

표 3. 전단강도

바깥 지름 (mm)	종류	전단강도 (kN)
500	A	228.6
	B	288.4
	C	313.9
600	A	311.0
	B	392.4
	C	427.7

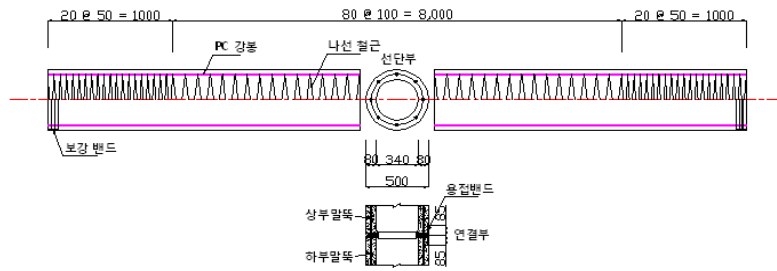
### 3. 스크류 PHC말뚝의 유한요소 해석

#### 3.1 스크류 PHC말뚝 개요

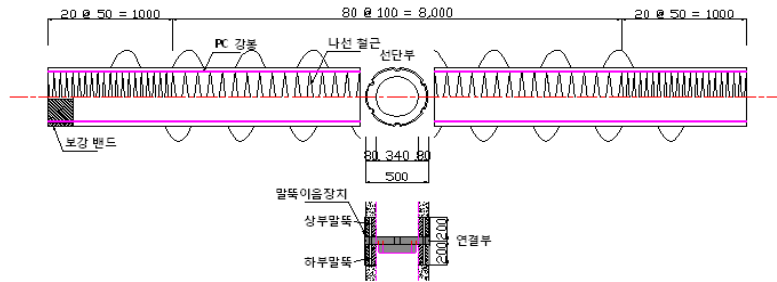
(1) 공법의 특징

- 무소음 무진동공법 (Noise & Vibration-Free Method)
- 배출되는 슬라임이 감소되는 환경 친화적 공법 (Environmentally Friendly Method)
- 주변 마찰력을 극대화 할 수 있는 공법
- 타공법과 달리 항타 및 마무리 경타가 필요하지 않아 소음과 진동을 완전 감소시킬 수 있는 공법
- 굴착공의 형성이 곤란한 토질에서도 굴착공의 붕괴를 방지할 수 있어 케이싱 없이 시공하므로 경제성이 우수
- 지반침공에 사용하는 오거장비를 개량하여 사용하므로 공정이 단순하고 그 만큼 공기단축의 효과도 우수

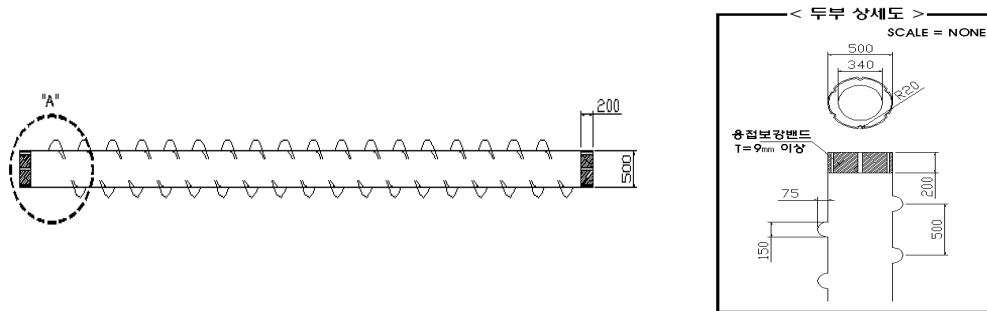
(2) 말뚝 형상



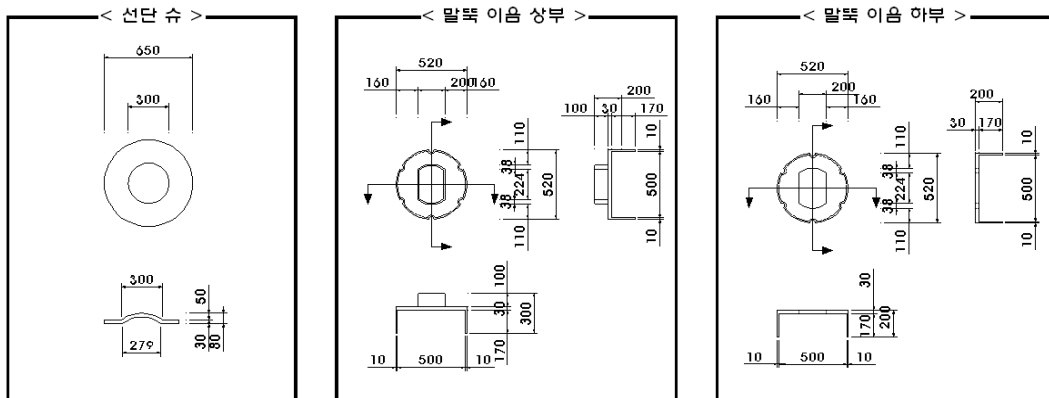
(a) 기존의 PHC말뚝



(b) 스크류 PHC 말뚝



(c) 말뚝의 모양 및 두부상세도



(d) 말뚝부속 상세도

그림 2. PHC 말뚝과 스크류 PHC 말뚝의 상세도

(3) 시공순서

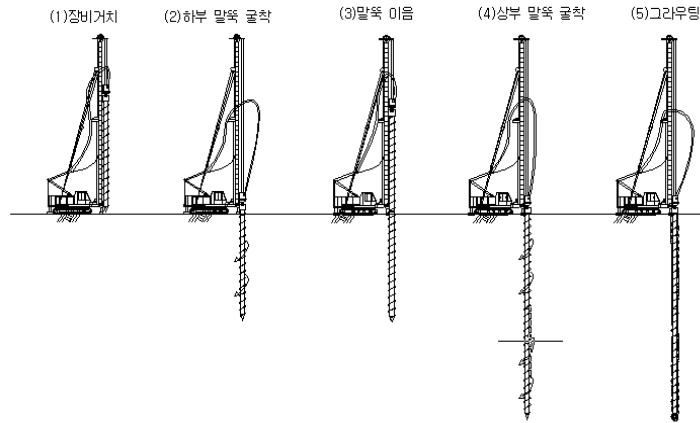


그림 3. 무소음·무진동 스크류 PHC말뚝의 시공법

3.2 대상 사례 선정 및 해석코드

(1) 지반조건

부산 명지주거단지의 지층분포 및 특성치(표 4)를 사용하였다.

표 4. 명지주거단지의 대표적인 지층 및 지반특성치 요약

구분	심도(m)	내부각 ( $\phi$ )	마찰계수	수평정지토압 $\sigma_0$ (MPa)	회전접선방향의 응력 (Mpa)
매립층	4.0	23.0	0.283	0.028	0.008
실트질점토	9.0	15.0	0.179	0.087	0.016
점토	10.0	24.0	0.297	0.120	0.036
자갈층	7.0	38.0	0.521	0.150	0.078
모래점토층	8.0	30.0	0.385	0.193	0.074
풍화암층	2.0	35.0	0.467	0.177	0.083

(2) 말뚝 제원

해석에 사용한 말뚝의 제원을 표 5에 나타내었다.

표 5. 해석에 사용한 말뚝의 제원

종 류	압축강도 (MPa)	직경 D (mm)	두께 t (mm)	포아송비 $\nu$	탄성계수 E (GPa)
스크류 PHC말뚝	80.0	500	80	0.2	35.0

### (3) 해석코드

ANSYS MECHANICAL은 선형 / 비선형 해석을 완벽히 수행하고, 금속에서 고무에 이르기 까지 다양한 재질에 대해서 해석이 가능한 포괄적인 SOLVER를 탑재하고 있다. 비선형 CONTACT이 포함된 복합적인 ASSEMBLIES를 다룰 수 있으며, 응력, 온도분포, 변위, 반력 분포 등을 결정하는데 최적의 해석 도구로 평가되고 있다. 또한, ANSYS MECHANICAL은 소음, 압전기(PIESOELETRIC), 열/구조, 열/전기 해석 등에 활용할 수 있는 프로그램이다.

## 3.3 스크류 PHC말뚝의 구조 모델링

10m의 PHC 말뚝 4개를 용접으로 이음하여 지중에 관입된 총 40m인 PHC말뚝에 대하여 그림 6과 같이 모델링을 하였다. 전체 구조물에서 스크류에 대한 영향은 크지 않으므로 스크류 구조는 제외하고 말뚝 4개를 빔요소로 모델링하였다.

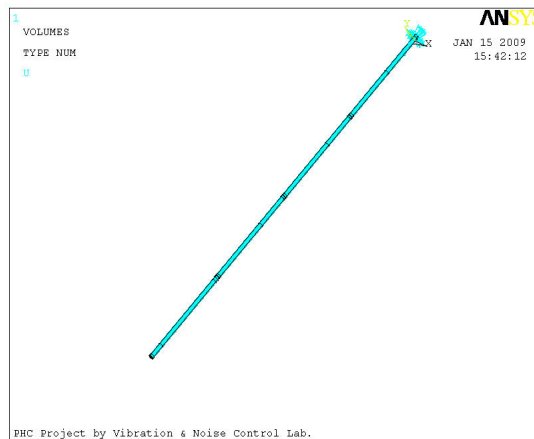


그림 6. 스크류 PHC말뚝의 전체 구조 모델

## 3.4 스크류 PHC말뚝의 이음부 상세 모델

결합부의 특성을 상세하게 모델링을 하였다. 결합부는 용접이음방식으로 모델링을 하였으며 이음부 상세 모델링은 그림 7과 같다.

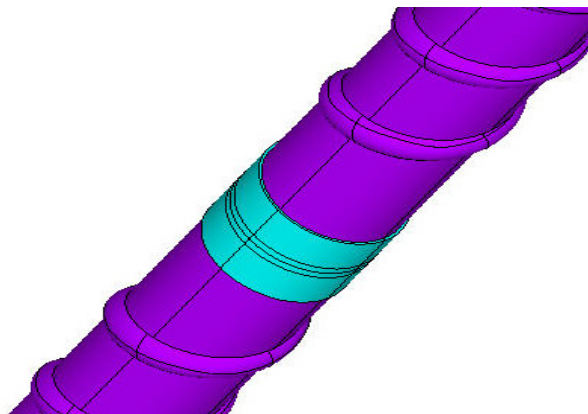


그림 7. 이음부의 상세 모델

### 3.5 입력치 선정

스크류 PHC말뚝 구조를 해석하기 위한 유한요소 자료 및 입력치는 표 6과 같다. 여기서 솔리드 185 요소를 이용하여 2157개의 절점과 1152개의 요소로 모델링하였다. 여기서 솔리드 185요소는 고체구조물 (Solid structures)의 3차원 모델링에 사용되며, 각 절점에서 3개의 자유도를 가지는 8개 절점으로 정의 되어 진다. 이 요소는 소성, 응력경화, 큰변형, 대변형 특성을 가진다. (ANSYS inc, 2007)

표 6. 스크류 PHC말뚝 시스템의 유한요소 모델링 자료

요소 형태		솔리드 185
절점 수		2157
요소 수		1152
강재	E (GPa)	210.0
	$\nu$	0.26
PHC 말뚝	E (GPa)	35.0
	$\nu$	0.2
회전관입력 (N · m)		108,200.0

### 3.6 스크류 PHC말뚝의 최대변위

스크류 PHC말뚝의 전체 길이에 대하여 구조해석을 수행하였으며 이 때 적용한 구속조건 및 하중조건 은 그림 8과 같다.

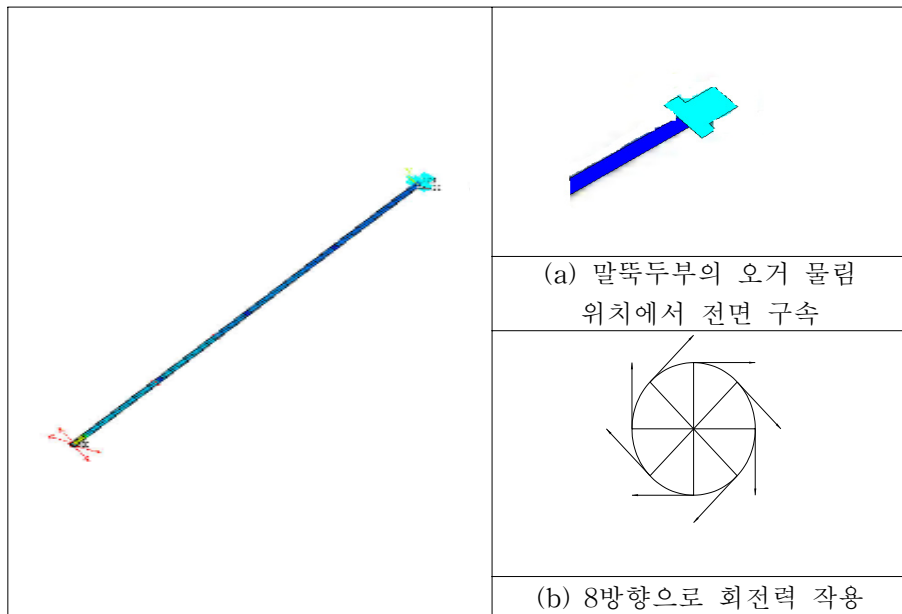


그림 8. PHC말뚝의 구속조건 및 하중조건



최대 회전관입력 108,200.0N·m일 때 스크류 PHC말뚝의 상단과 선단의 상대변위는 최대 0.24mm가 발생하였으며 그 결과를 그림 9에 나타내었다.

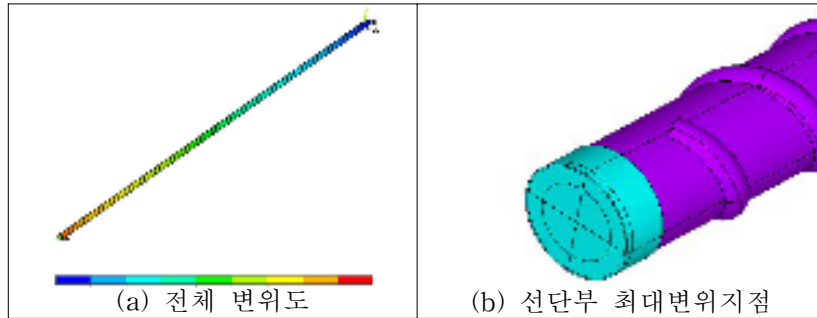


그림 9. 말뚝 전길이에 대한 변위와 선단부의 최대 변위

### 3.7 두부와 용접 이음부에서 발생하는 응력

최대응력은 38~40m 지점에서 발생하였고, 용접이음부 및 강제 부분이 아닌 콘크리트 부분에서 발생하였다. 최대응력은 선단부에서 8.7MPa만큼 발생하였다.

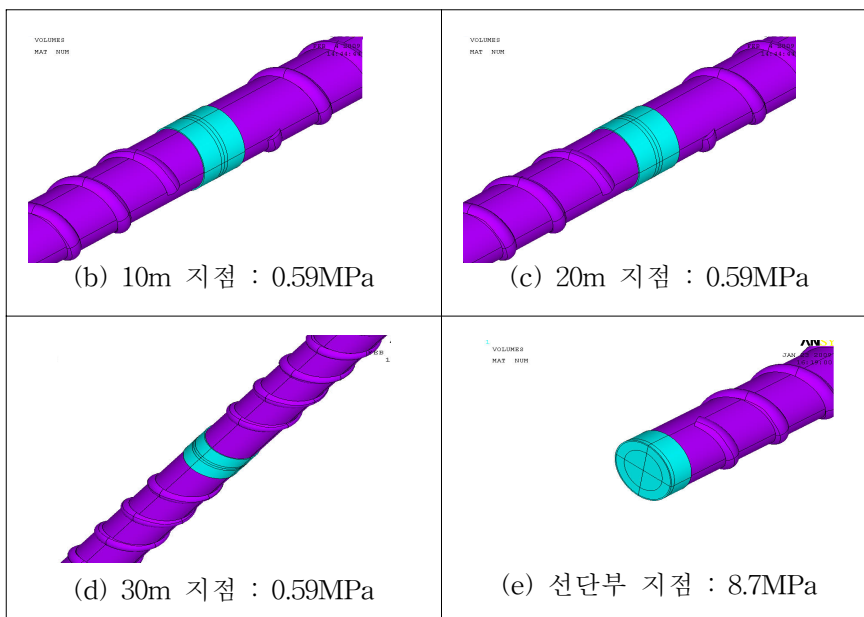
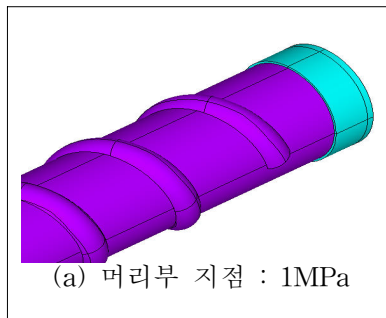


그림 10. 말뚝머리부와 용접이음부에서의 응력

## 4. 결론

부산 명지지역의 지반조건을 고려하여 스크류 PHC말뚝(직경 500mm, 길이 40m)을 지중에 회전·압입시킨 사례에 대하여 수치해석 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 스크류 PHC말뚝의 용접이음한 각 말뚝의 선단부인 10, 20, 30, 40m 위치에서 발생된 상대회전 변위는 0, 0.06, 0.06, 0.18, 0.24mm 이었다.
- 2) 회전관입에 의한 최대응력은 38~40m 지점에서 8.7MPa만큼 발생하였으며 선단콘크리트부에서 최대응력이 발생한다는 것을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 및 한국산업기술재단의 2008년도 지역혁신인력양성사업(과제번호 : 20080703160330)의 지원을 받아 수행되었음

## 참고문헌

1. KS F 4306(2003), “프리텐션 방식 원심력 고강도 콘크리트 말뚝”
2. 이용화(2008), “대심도 연약지반에 근입된 PHC말뚝기초의 하중전이특성 및 극한지지력 산정”, 인제대학교 석사학위 논문
3. ANSYS inc. (2007), ANSYS 11.0 Theory Reference