

공학석사 학위논문

선 굴착 PHC 말뚝의 시간경과에 따른
주면마찰력에 관한 고찰



2011년 7월

부경대학교 산업대학원

토 목 공 학 과

장 성 두

공학석사 학위논문

선 굴착 PHC 말뚝의 시간경과에 따른
주면마찰력에 관한 고찰

지도교수 이 환 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2011년 7월

부경대학교 산업대학원

토 목 공 학 과

장 성 두

장성두의 공학석사 학위논문을 인준함



주 심 공학박사 정 두 회 ㉠

위 원 공학박사 이 영 대 ㉠

위 원 공학박사 이 환 우 ㉠

목 차

1. 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구동향	2
1.3 연구방법 및 범위	4
2. 말뚝지지력 산정	5
2.1 개요	5
2.2 이론적 방법	5
2.2.1 Meyerhof 방법	6
2.2.2 SPT-CPT 전환법	7
2.2.3 NAVFAC DM-7 방법	10
2.2.4 Stability Plot 방법	10
2.3 현장시험방법	12
2.3.1 정적 재하시험	12
2.3.2 동적 재하시험	13
3. PHC 말뚝 동재하 시험	17
3.1 개요	17
3.1.1 지반조사	17
3.1.2 토질시험	19
3.1.3 주입용 시멘트 밀크 배합	22
3.2 시험방법	22
3.2.1 시험시공	22
3.2.2 현장 재하시험	24

4. 실험결과	25
4.1 점성토 지반	25
4.1.1 시멘트 밀크 미 주입	25
4.1.2 시멘트 밀크 주입	29
4.2 풍화토 지반	33
4.2.1 시멘트 밀크 미 주입	33
4.2.2 시멘트 밀크 주입	37
4.3 시험 결과 분석	41
4.3.1 시멘트 밀크 주입 효과	41
4.3.2 상부 구조물 시공의 최적화 시기	41
5. 결 론	44
참고문헌	46



그 립 목 차

그림 2.1 SPT-CPT 관계(Robertson and Campanella, 1983)	8
그림 2.2 Stability Plot 방법	11
그림 2.3 현장 파형	14
그림 2.4 분석 파형	14
그림 3.1 지질 주상도	18
그림 3.2 풍화토시료 입도분포곡선	20
그림 3.3 점성토시료 입도분포곡선	20
그림 3.4 풍화토 유동곡선	21
그림 3.5 점성토 유동곡선	21
그림 3.6 시험 시공 순서도	23
그림 3.7 말뚝항타분석기의 구성도	24
그림 4.1 점성토지반에서 말뚝지지력분담률경시변화(시멘트밀크 미주입) ..	28
그림 4.2 점성토지반에서 말뚝지지력분담률경시변화(시멘트밀크주입) ..	32
그림 4.3 풍화토지반에서 말뚝지지력분담률경시변화(시멘트밀크 미주입) ..	36
그림 4.4 풍화토지반에서 밀크 주입 시 분담비교	40
그림 4.5 주면 마찰력 비교	42

표 목 차

표 2.1 상세한 SPT - CPT 관계: $q_c(1\text{bar} \doteq 1\text{kg/cm}^2)$	8
표 2.2 점성토의 굳기와 SPT 및 CPT의 관계	9
표 2.3 사질토의 상대밀도와 SPT 및 CPT의 관계	9
표 3.1 시료의 물성치	21
표 3.2 시료의 전단특성값	21
표 3.3 시멘트 밀크 배합비(m^3)	22
표 4.1 시공 직 후 점성토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 미 주입)	25
표 4.2 3일 경과 후 점성토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 미 주입)	26
표 4.3 7일 경과 후 점성토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 미 주입)	26
표 4.4 21일 경과 후 점성토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 미 주입)	27
표 4.5 28일 경과 후 점성토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 미 주입)	27
표 4.6 시공 직 후 점성토 지반에서의 지지력(시멘트밀크주입)	29
표 4.7 3일 경과 후 점성토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 주입)	29
표 4.8 7일 경과 후 점성토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 주입)	30
표 4.9 21일 경과 후 점성토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 주입)	30
표 4.10 28일 경과 후 점성토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 주입)	31
표 4.11 시공 직 후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 미주입)	33
표 4.12 3일 경과 후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트밀크 미주입)	34
표 4.13 7일 경과 후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 미주입)	34
표 4.14 21일 경과 후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 미주입)	35
표 4.15 28일 경과 후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 미주입)	35

표 4.16 시공 직 후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 주입) 37
표 4.17 3일 경과 후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 주입) 37
표 4.18 7일 경과 후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 주입) 38
표 4.19 21일 경과 후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 주입) 38
표 4.20 28일 경과 후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 주입) 39



Evaluation of Skin Friction on the Pre-Bored PHC Pile with Time

Sung-Dou, Jang

*Department of Civil Engineering, Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

As pile foundation works are increasing in urban farm stalls and residential areas, the concerns about environmental issues are increasing. Pre-bored pile method which is a method with low noise and vibration has been applied a lot. To adapt to these changes in conditions, the method in which once we dig the ground, we inject cement milk and then insert the precast pile, is chosen. In case of general pre-bored pile, design and construction management is conducted by injecting cement milk to secure the skin friction and fix the central location of pile. However, sometimes cement milk is injected uniformly onto the full length of pile upon the decision of which injection of cement milk increases the skin friction regardless of soil condition of weathered soil and cohesive soil. The purpose of this study is to determine when the skin friction bearing of pile comes to the stabilization step, to present the most optimal time for superstructure construction over time, and to investigate the degree of influence of injected cement milk on actual skin friction according to soil condition and the necessity of injection of cement milk uniformly. It is examined what kinds of behavior does bearing power partition progress show over times under conditions of point bearing pile classified into weathered and cohesive soils, depth consistency and injection of cement milk through dynamic load test. Analysis showed that the optimal time for superstructure construction on ground of cohesive soil was 7 days. However, it's shown that the effect of injection of cement milk on ground of cohesive soil was not big, since the changes in friction were similar regardless of injection of cement milk. In case of weather soil, age caused by milk injection was dominant. It would be economically feasible if skin friction is considered as bearing power on 21 days of the most optimal time for superstructure construction upon the design.

keyword: Skin Friction negative, skin friction negative, Pre-Bored PHC

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

일반적으로 기초지반의 지지력은 지반의 강도에 의해 결정되며, 하중이 증가함에 따라 기초의 크기가 커지거나 근입 심도가 깊어지게 된다. 지반의 강도가 부족한 경우에는 하중강도를 낮추기 위해 기초의 폭을 확대하면 부지확보가 곤란 할 수 있기 때문에 기초의 근입 심도를 증가시키기도 한다. 특히 기초지반이 연약한 경우에는 기초의 근입 심도를 증가시키는 공법을 일반적으로 선택하게 되고, 기초에 전달되는 하중이 대단히 큰 경우는 기초 전체를 깊게 근입하기도 한다. 하지만 이와 같은 경우에는 공사비가 증가되기 때문에 말뚝공법의 도입이 필연적이다.

말뚝 공법은 강성이 큰 강재나 콘크리트 등을 단단한 심층에서 기초가 지지되도록 하여 상부하중을 견고한 지층에 바로 전달하도록 한다는 것이 일반적이다. 하지만 견고한 지층에 도달하기 전에 자갈이나 호박돌 등으로 구성되어 있는 지층을 통과하여 말뚝을 시공 할 경우 타격에 의한 근입에 아주 큰 어려움을 겪는다. 그리고 도심지나 건물의 근접 시공을 할 때는 진동에 의한 지반변형을 수반하여 주변 건물의 손상을 유발하기도 하고, 소음으로 민원을 발생시키기도 하여 시공 및 품질 관리에 어려움을 겪는다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 선 굴착을 통하여 지층을 확인하고 근입시켜 말뚝의 침하량을 최소화시키는 말뚝시공이 필요하다.

일반적인 선 굴착 말뚝의 경우 말뚝의 주면 마찰력 확보와 중심위치를 고정하기 위한 시멘트 밀크를 주입하여 설계 시공 관리한다. 마찰력은 지층의 구성상태, 공벽유지, 작업의 능력, 시멘트밀크의 배합비에 따른 흙-시멘트의 강도 주입량 등 품질관리에 따라 많은 차이를 나타내므로 철저한 시공관리가 필요하다. 시멘트밀크의 주입이 풍화토 점성토와 관계없이 주면 마찰력이 증대할 것으로 예상하므로 말뚝

전장에 일률적으로 주입 시공하여 관리 한다. 이와 같이 시멘트 밀크 주입이 풍화 토 점성토 지반에 관계없이 필요한지 여부 및 어느 시점에 안정화 단계로 접어드는지, 상부 구조물의 최적 시공시기를 판단 할 수 있는 근거가 없는 실정이다.

이 연구에서 선 굴착 공법으로 시공된 말뚝의 시멘트 밀크의 주입 여부에 따라 시험 기간을 세분화하여 주면마찰력이 시간에 따라 어떤 거동을 보이는지를 동적 재하시험을 통하여 규명해 보고자 한다. 시험자료를 시간에 따른 선단지지력과 주면마찰력 분담추이 자료를 획득하고 분석하여 마찰증대효과 측면에서 일률적인 시멘트주입이 필요한지 여부, 상부구조물의 시공 최적화시기를 제시하고자 한다.

1.2 연구동향

말뚝기초의 지지력 산정 방법에는 경험에 의한 이론적방법과 시험적 방법이 있다. 설계과정에서 이론적 방법으로 지지력을 산정하여 실시설계 또는 시험시공을 통하여 최종확인하게 된다. 선 굴착 지지력 산정은 말뚝의 주면과 지반사이의 저항력을 직접 전단시험으로 측정 수직하중에 가장 크게 영향을 받는다는 것을 밝혀냈고, 국내 주요 토질인 실트나 점토를 함유한 모래지반에서 이를 인자로 한 최대 주면저항력 산정식을 제안하고 있다 (대한주택공사, 2001). SIP 말뚝(soil cement injection precast pile) 재하시험결과와 이론식에 의한 지지력을 비교분석한 결과 총 지지력 값에서는 보수적인 Meyerhof ($20\overline{N}_b A_b$)방법이 가장 신뢰성이 있는 것으로 나타났다(박종배,2003). 국내에서는 주로 Meyerhof (1976) 식을 근간으로 하고 계수조정 하여 사용하고 있다. 선 굴착 SIP(soil cement injection precast pile)말뚝의 경우 주면마찰력과 선단지지력으로 구성되는데 일반적으로 주로 주면마찰력에 의해 지지되는 것으로 알려져 있지만 선단지지력과 주면마찰력의 구성 비율이나 크기는 지반조건과 시공특성에 따라 다르다. 따라서 이런

SIP(soil cement injection precast pile)말뚝의 전체 지지력에서 주변마찰력과 선단지지력 분담율에 대한 많은 연구가 제시되고 있다. 주변마찰력이 선단지지력의 평균 10% 이하의 하중 분담율을 가지고 하중의 대부분을 선단에서 분담한다는 결과를 비롯하여 188개의 동재하시험 중 동일 말뚝에서 항타시 시험과 재항타(Restrike) 시험결과를 분석한 결과, 주변마찰력 대 선단 지지력이 약 46 : 54로 제시된 경우도 있다(김정수, 2003). 또 국내 4개 현장의 23개 SIP(soil cement injection precast pile)말뚝 CAPWAP(case pile wave analysis program) 분석을 바탕으로 주변마찰력과 선단지지력비를 분석한 결과, 약 60.9 : 39.1로 주변마찰력이 우세한 연구결과도 제시되었다(이인모외 3인 1995). 원제(2000.12)는 3개 현장에서 동재하시험과 정재하시험을 병행한 결과로부터 주변마찰력과 선단지지력비를 39.8 : 60.2로 분석하여 선단지지력이 우세한 지지성분임을 도출하였는데 주변마찰력은 시험당시에 순 침하량이 미소하여 충분히 발현되지 않았음을 고려할 때 과소평가한 것으로 분석하였다. 임종성(1997) 등은 이형 선 굴착 시멘트풀 주입 말뚝공법(KSIP : KUMHO Spiral pre-bored, cement paste injected precast pile) 11본의 시험시공을 통해 주변마찰력에 의해 지지되는 비율을 약 50%라고 분석하고 다양한 연구를 통해 설계에 반영하는 것이 타당하다고 제시하였다.

1.3 연구방법 및 범위

프리텐션 고강도 콘크리트 PHC(Pretensioned High Strength Concrete) 말뚝 직경 400mm, 두께 65mm, 말뚝길이 30m, 관입 29m, 노출 2m로 된 5분을 1조 4개조를 하여 토질이 다른 점성토 풍화토로 구분하여 시멘트 밀크를 주입 여부에 따라 구분하였다. 교란된 흙의 강도회복 및 주입되는 시멘트 밀크 재령을 고려하여 시공직후 3일 7일 21일 28일 간격으로 현장시험을 실시하였다. 이 기준으로 시간이 경과함에 따라 주면마찰력이 어떤 거동을 보이는지 동적 재하시험에 의해 분석하였다. 시간에 따른 선단지지력과 주면마찰력 분담추이를 분석하였으며, 이를 통해 주면마찰효과 측면에서 일률적인 시멘트주입이 필요한지 여부, 상부구조물의 시공 최적화시기를 마찰력증가의 정량화를 통하여 선 굴착된 말뚝기초지력의 공학적 거동을 파악하고자 한다.

2. 말뚝지지력 산정

2.1 개요

말뚝의 축방향 허용지지력은 지반의 허용지지력과 말뚝재료의 허용하중을 비교하여 낮은 값으로 결정하게 된다. 일반적으로 말뚝이 설치되는 지반의 허용지지력은 말뚝 시공 상의 한계 때문에 말뚝재료의 허용하중에 비하여 낮은 것이 보통이다. 따라서 말뚝의 축방향 허용지지력은 지반의 허용지지력에 의하여 결정되는 경우가 대부분이다. 기초말뚝의 축방향 허용지지력은 외 말뚝의 축 방향 극한지지력을 소정의 안전율로 나눈 값을 기준으로 하고, 말뚝재료의 압축응력, 이음에 의한 감소, 장경비에 의한 감소, 부주면마찰력, 무리말뚝의 효과, 말뚝침하량을 고려하여 판정한다. 외말뚝의 축방향 지지력을 결정하는 방법으로는 정역학적 지지력 공식, 현장시험 결과에 의한 경험공식, 파동방정식, 동역학적 항타공식, 기존자료에 의한 추정법 등이 이용되고 있으며 이들 각 방법들은 축방향 지지력 결정의 목적, 현장여건 등에 따라 선택적으로 적용된다(구조물 기초설계기준 해설, 2003). 이론적 마찰력 계산에 이용한 방법은 Meyerhof (1976)방법, NAFAC DM-7 방법 및 표준관입시험-콘관입시험(SPT-CPT)전환법 등이 있다.

2.2 이론적 방법

말뚝 지지력 설계법인 Meyerhof 방법, SPT-CPT 전환법, NAVFAC DM-7 방법 및 재하시험결과 판정법인 Stability Plot 방법의 이론적 배경

및 산정절차에 대해 간략히 소개한다.

2.2.1 Meyerhof 방법

현재 국내에서 SIP 지지력 설계시 사용하고 있는 방법은 Meyerhof가 1976년도에 제안한 방법으로 항타말뚝의 설계법을 $20 \overline{N}_b A_b$ 근간으로 하고 있으며 기본 식으로는 아래 식을 사용하고 있다.

$$Q_d = \frac{1}{3} [30 \overline{N}_b A_b + (0.2 \overline{N}_s L_s + 0.5 \overline{q}_u L_c) \times L_p] \quad (1)$$

\overline{N}_b : 선단 아래 1D와 선단 위로 4D 지반범위에서의 평균 N값 (≤ 50)

A_b : 말뚝 선단부의 단면적 ($= \frac{\pi D^2}{4}$)

\overline{N}_s : 사질지반의 수정 평균 N값: $0.2 \overline{N}_s \leq 101 t/m^2$

L_s : 모래층의 깊이

\overline{q}_u : 점토층의 평균 일축압축강도 $= 1.25 \overline{N}_c \leq 10 t/m^2$

L_c : 점토층의 깊이

L_p : 말뚝의 둘레 $= \pi D$

일본의 건설성기준에 의하면 선단부의 시공방법에 따라서 선단지지계 산식이 $20 \sim 30 \overline{N}_b A_b$ 로 변한다. 즉 최종타격공법일 경우에는 $30 \overline{N}_b A_b$, 최종경타공법은 $25 \overline{N}_b A_b$ 이며 시멘트풀 주입공법인 경우에는 $20 \overline{N}_b A_b$ 이다 (한국지반공학회, 2003).

2.2.2 SPT-CPT 전환법

유럽의 경우 연약 점토와 이탄을 관통하여 조밀한 모래지반을 지지층으로 활용하고 말뚝설계를 위한 지반조사로 콘관입시험(Cone Penetration Test; CPT)에 의존하고 있다. 콘관입시험기는 전기식 또는 기계식으로 구분되며, 시험이 간단하고 시험결과의 정확성이 우수할 뿐 아니라 지층의 연속적인 조사가 가능한 것으로 알려져 있다. 아직까지는 콘관입시험(CPT)을 이용한 지반조사 방법이 표준관입시험 방법에 비하여 국내는 물론 구미 선진국에서도 이용되지 않고, 시험 가능한 토질도 점성토와 느슨한 사질토에 한정되어 있고 국내에서는 말뚝설계에는 거의 사용되지 않는 실정이다.

콘관입시험 결과를 이용한 지지력 산정법의 장점은 주면마찰력 산정결과의 신뢰도가 높다는 것이다. 국내에서는 지반 여건상 콘관입시험을 실시하지 못하므로 표준관입시험 결과를 콘관입시험의 결과로 전환하여 SIP의 지지력을 산정할 수 있다.

표준관입시험과 콘관입시험 결과의 상호관계에 대한 많은 연구 결과들이 지금까지 발표되었는데, Robertson and Campanella(1983)가 제안한 SPT-CPT 관계 그림 2.1, 표 2.1, 표 2.2 그리고 표 2.3과 같이 많은 시험 결과를 토대로 하고 있는 매우 유용한 자료로 여러 나라에서 이들이 제시한 도표를 사용하고 있다.(대한주택공사,1997).

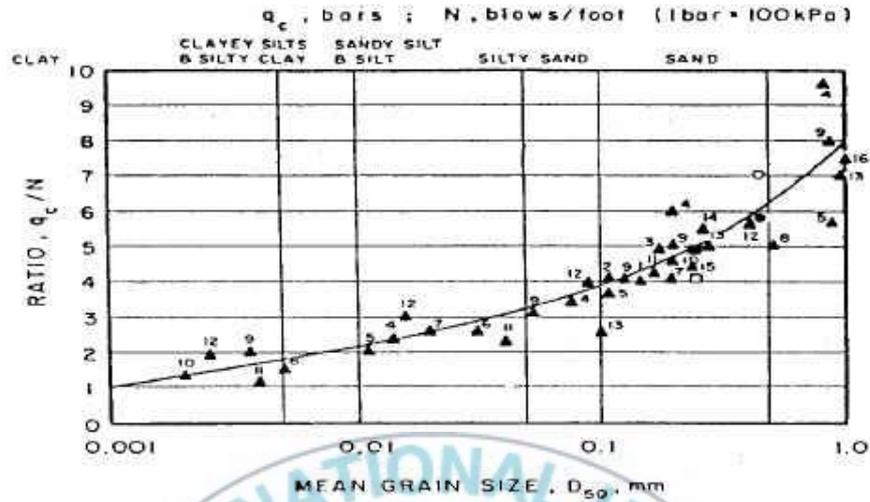


그림 2.1 SPT-CPT 관계(Robertson and Campanella, 1983)

표 2.1 상세한 SPT - CPT 관계: q_c (1bar = 1kg/cm²)

흙의 종류	q_c/N
실트(점토질 실트는 1)	1~2
실트/사질 실트/약간 점착성이 있는 실트 모래	2
혼합토	2.5
실트/(점토질 실트)	2.5
실트질 점토/모래섞인 점토	2.5
실트질 실트/(실트질 점토, VI)	3
(약) 실트질 모래	3.5
세립-중립질의 모래	3.5
세립질의 모래	4
중립질의 모래	5
자갈섞인 점토	4~4.5
굵은모래/작은자갈 섞인 모래	5또는 6~10
모래 섞인 자갈/자갈	6또는 11~18

표 2.2 점성토의 굳기와 SPT 및 CPT의 관계

N치 (회/30cm)	비배수 강도 ($C_u = \text{kg/cm}^2$)	전환관계	CPT ($q_c = \text{kg/cm}^2$)
2이하	0.25 이하 (매우연약)	$q_c = c_v \times 15$	3이하 (2.88)
2~4 4~8	0.25~0.5(연약) 0.5~1.0 (중간 또는 굳은점토)	$q_c = c_v \times 12$	3(2.88)~5.75 5.75~10
15~30	1~2 (굳은점토) 2~3.83 (매우 굳은 점토)	$q_c = c_v \times 15$	10~20 20~40
30이상	3.83이상 (단단한 점토)	-	40이상

표 2.3 사질토의 상대밀도와 SPT 및 CPT의 관계

N치 (회/30cm)	상대밀도 모래(세립 모래)	CPT(q_c 값) (kg/cm^2)	유효 마찰각(Φ)
0~4	매우 느슨	20이하	30° 이하
4~10	느슨	20~50또는 (20~40)	30°~35°
10~30	중간 조밀	50~150또는 (40~120)	35°~40°
30~50	조밀	150~250또는 (120~200)	40°~45°
50이상	매우 조밀	250 이상 또는 (200이상)	45° 이상

2.2.3 NAVFAC DM-7 방법

NAVFAC DM-7 방법은 균질한 사질토 지반과 점성토에서 단말뚝의 극한지지력을 계산한다. 이 방법은 점성토에서 말뚝의 극한지지력을 Skempton(1951) 방법과 Tomlinson(1957)이 제안한 부착력 관계를 근간으로 하고 있다. 현장관찰에 의하면 선단 및 주면의 저항은 연직 유효응력에 비례하여 증가하다가 한계깊이 이상에서는 더 이상 증가하지 않는다. 한계깊이는 토질의 상대밀도와 지하수위에 따라 달라지며 말뚝직경의 10배에서 40배 사이이다.

NAVFAC DM-7 방법은 균일한 지반조건을 전제로 하고 한계깊이를 정하고 있지만 국내의 지반조건은 다양한 전단강도 특성을 가진 여러 개의 층으로 이루어진 경우가 많고 깊이에 따라 강도가 증가하는 경향을 나타내기 때문에 한계깊이 개념은 국내지반조건과 맞지 않다. 그러므로 한계깊이에 상관없이 각 지층의 강도특성을 고려하여 지지력을 산정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 대부분의 지지력 계산법은 극한지지력에 대해 안전율을 3을 적용하여 허용지지력을 구하는데 NAVFAC DM-7 방법은 구조물의 하중과 지반조건을 정밀하게 조사한 경우에는 안전율을 최소 2까지 적용할 수 있다(대한주택공사, 1997).

2.2.4 Stability Plot 방법

Stability Plot 방법은 기존의 Chin(1970) 방법이 극한하중을 과대평가하는 것을 Chin & Vail(1973)이 수정한 것으로 극한 침하량을 말뚝직경의 10%로 제한하였다. 이 방법은 기존 Chin 방법과 마찬가지로 재하시험에서 극한하중까지 재하하지 않아도 극한하중을 판정할 수 있으며 선단지지력과

마찰지지력을 분리하여 해석할 수 있다는 장점이 있다. Roscoe(1984)와 Neely(1991)는 이 방법이 신뢰성이 있다고 하였다.

이 방법은 그림 2.2와 같이 Y축을 침하량/하중으로 X축을 침하량으로 하여 재하시험 데이터를 정리하면 하중-침하곡선이 2개의 직선으로 나누어진다. 두 직선 중에서 첫 번째 직선의 기울기를 역으로 계산한 값이 극한 주면마찰력이다(대한주택공사, 1997).

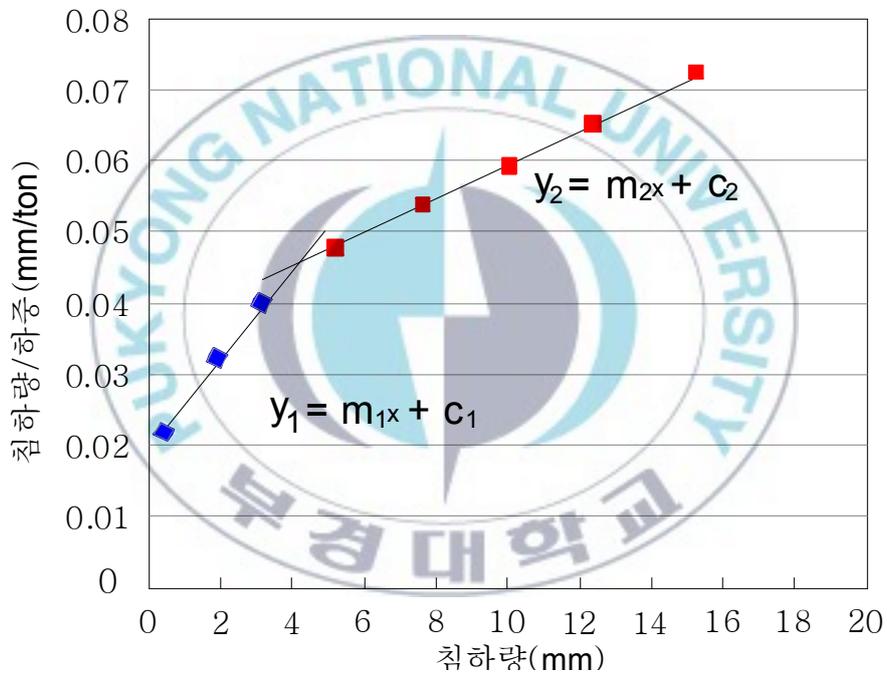


그림 2.2 Stability Plot 방법

2.3 현장시험에 의한 산정방법

2.3.1 정적 재하시험

말뚝 설치 후 일정한 시간(가급적이면 긴 시간이 좋지만 최소 1~2주일 후)이 경과한 후의 두 차례에 걸쳐 말뚝재하시험을 실시하여 시간경과 효과를 확인한다. 시간경과 효과를 확인한 다음에는 시공관리 목적에 따라 설치시 또는 시간이 경과한 후 말뚝재하시험을 조절하여 실시한다(구조물 기초설계기준 해설, 2003). 말뚝의 재하시험에는 정적재하시험과 동적재하시험 방법이 있으며, 정적인 재하시험은 설계하중의 2~3배의 재하하중이 필요하다. 하중재하 방법은 다음과 같다.

- ① 사하중을 직접 재하하는 방법
- ② 반력말뚝의 주면마찰력을 이용하는 방법
- ③ 지반앵커 반력을 이용하는 방법
- ④ 시험말뚝 자체의 주면마찰력을 이용하는 SPLT(Simple Pile-Load Test) 방법

위의 방법으로 충분한 크기의 반력하중을 확보한 후에 유압잭을 이용하여 원하는 하중만을 말뚝에 전달시키는 방법을 택한다. 시험방법으로는 표준재하시험(Standard Load Test), 반복하중재하시험(Cyclic Load Test), 급속하중재하시험(Quick Load Test Method), 하중증가평형시험(Incremental Equilibrium Load Test), 일정침하율시험(Constant Rate Of Penetration Load Test), 일정침하량시험(Constant Settlement Increment Load Test), 완속재하시험(Slow Maintained Load Test), 스웨덴 반복

하중재하시험(Swedish Cyclic Test) 방법 등이 있다. 마찰력을 구하기 위해서는 축하중을 가하는 정재하시험으로는 곤란한 경우 축방향의 말뚝을 인발하는 인발시험이 필요하다.

2.3.2 동재하시험

1) 개요

동재하시험(Dynamic Pile Test)은 국내에 많이 도입되어 사용 빈도가 높은 시험방법으로서 정하중 시험의 단점 해소의 한 방안으로 개발, 사용되어 왔다. 동재하시험은 말뚝종류와 시공방법에 관계없이 적용할 수 있으며, 재하를 위한 반력말뚝, 사하중, 반력앵커 또는 폭발장치 등을 필요로 하지 않는다. 따라서 정재하시험의 재하하중 설치 및 시험에 소요되는 시간으로 인한 비경제성의 단점을 해소하며, 말뚝의 위치를 임의로 선정할 수 있어 종래에는 시험이 거의 불가능하였던 대구경 현장타설말뚝 및 해상 말뚝의 시험도 용이하게 실시할 수 있다.

동재하시험은 말뚝항타분석기(PDA; Pile Driving Analyzer)를 이용, 항타기로 말뚝 두부에 낙하시키면 말뚝의 변위와 가속도를 변형률계(Strain Transducer)와 가속도계(Accelerometer)를 이용하여 측정된 변형률과 가속도를 항타 즉시 변형률계와 가속도계로 측정된 변형률과 가속도로 부터 각각 독립적으로 그림 2.3과 같은 힘(F)과 속도(V)의 파형을 얻을 수 있고 이것을 그림 2.4와 같이 분석하여 항타기의 효율적인 작동여부, 말뚝에 작용하는 압축력 및 인장력, 전달에너지, 예상지지력, 말뚝의 손상정도 등을 나타낸다. 따라서 동재하 시험을 실시할 경우 시공과정에 있는 말뚝의 종

류, 시공방법, 관입심도 및 항타기의 선정 등 파일공사에 있어서의 전반적인 사항들을 미리 파악하여 현장실무에 적절히 이용 할 수 있다(구조물 기초 설계기준, 2009).

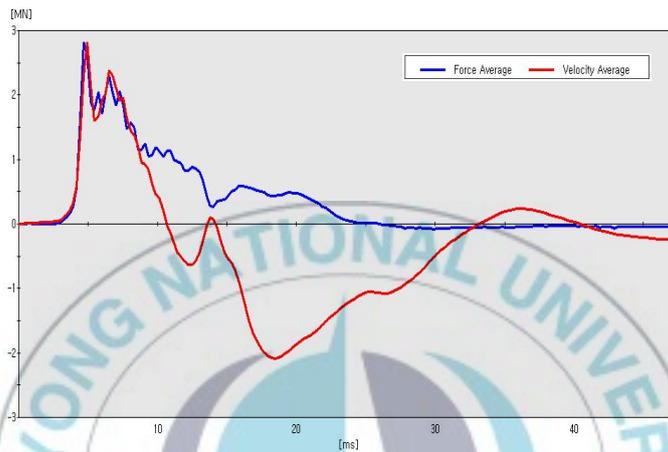


그림 2.3 현장 파형

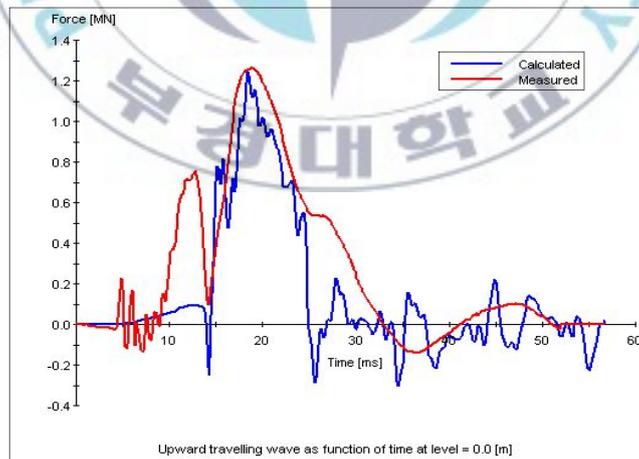


그림 2.4 분석 파형

2) 파동방정식의 기본이론

탄성봉(Elastic Bar)에 충격을 가할 경우 탄성봉의 선단에서 응력과 (Stress Wave)가 발생하여 끝단으로 전파된다. 이로 인해 탄성봉 내에서는 시간에 따른 관성력(Inertia Force) 및 변위(Displacement)가 발생하고 이러한 힘과 변위의 관계는 다음과 같이 유도된다. 탄성봉내의 임의의 요소에서 Newton의 제 2법칙 $F=Ma$ 에 의한 힘의 합은 식(2)과 같이 된다.

$$-\sigma A + (\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x} \Delta x) A = \rho A \Delta x (\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}) \Rightarrow \frac{\partial \sigma}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2)$$

$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x}$ 이므로 Hooke의 법칙을 적용하면 $\frac{\partial \sigma}{\partial x} = E_p \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = E_p \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ 이 되고, 이를 식(2)에 대입하여 정리하면, 식(3)과 같은 파동방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E_p}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3)$$

여기서 u : 탄성봉(말뚝)의 축방향 변위

E_p : 탄성봉(말뚝)의 탄성계수

ρ : 탄성봉(말뚝)의 밀도

t : 시간

X : 진행파의 위치

식(3)의 좌변과 우변은 각각 가속도와 변형율에 대한 편미분 방정식이 된다. 그러나 말뚝의 경우는 자유공간이 아닌 지반 속에 관입되므로 말뚝의 선단 및 주변 지반의 저항치를 고려하여 식(4)와 같이 수정되어야 하며, 이 경우 R은 흙의 성질 및 항타 시스템에 따라 상당히 복잡한 양상을 나타내

게 된다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E_p}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \pm R \quad (4)$$

여기서, R : 흙의 저항치

이와 같은 파동방정식은 말뚝에서의 응력의 변화로부터 말뚝의 변위와 시간 그리고 요소위치 사이의 관계를 결정하기 위해 초기조건과 경계조건을 사용하여 해를 구할 수 있다. 그러나 실제의 말뚝 항타시에 말뚝과 항타장비 그리고 주변의 흙의 성질에 관련된 여러 복잡한 인자들로 인해 말뚝의 파동 방정식을 해석하기는 상당히 어려운 실정이다. 그러므로 파동방정식을 해석하는 방법으로 적용되고 있는 것은 실제의 말뚝을 분할 요소로 나누어서 항타에 의한 충격파의 전달 과정을 각 요소마다 시간별로 표시하여 변위와 응력 등을 계산하고 극한지지력에 따르는 최종 항타 시 관입량 등을 컴퓨터를 사용하여 수치 해석하는 것이다.

3)입력자료

파동방정식을 이용한 말뚝항타 해석 프로그램 사용할 때 필요한 입력자료는 아래와 같다.

① 해머 및 항타 시스템(항타기)

해머 쿠션(cushion)의 면적, 탄성계수, 반발계수, 스프링 상수

② 말뚝

길이와 단면적, 탄성계수, 반발계수 및 스프링 상수, 단위중량

③ 지반

극한 지지력 및 지지력 비율, 선단과 주면의 변형특성

3. PHC 말뚝 동재하 시험

3.1 개요

이 시험을 위하여 토질이 다른 점성토와 풍화토 지반을 선정하였고, 토층 분포를 파악하기 위하여 시험말뚝 배치위치와 가장 인접한 곳 각각 2개소를 선점하여 지질조사 선정하였으며, 지질조사에서 점성토지반에서는 불교란 시료를 채취 할 수 없어서 6m 시험굴착을 통하여 시료를 취하였다.

3.1.1 지반조사

풍화토 지반에서는 현 지반고에서 시추 시작점부터 종료까지 풍화토층으로 구성되어 있으며 풍화가 덜 진행된 암석의 맥층이 암편으로 혼재되어 있는 상태이고, 점착력이 높은 점토질 풍화토로 구성 되어 있다.

본 역의 풍화토층은 모암이 지하수의 유입 등 자연적 조건의 변화로 인하여 풍화작용을 거쳐 완전 내지 높게 풍화되어 모암의 기본조직이 거의 남아있지 않으며 화학적 및 물리적 성질을 원 암석의 조직과 형태를 그대로 보존하고 있으나 원암석이 토사로 변해가는 과정에 있는 상태이며 시추조사시 굴진속도, 순환수의 투수정도 및 Slime, 광물의 풍화도(風化度) 등을 참고하여 구분하였다.

시추조사에서 풍화토 지반에서는 연암 상단 G.L.-30m 지점에서 시추를 종료하였으며, 지하수위는 G.L.-25m에 위치하고 표준관입시험결과 N치는 12/30 ~ 21/30의 범위로 나타났다. 점성토에서는 풍화암 상단 G.L.-30m 지점에서 시추를 종료하였으며, 지하수위는 G.L.-3m에 위치하고 표준관입시험결과 N치는 1/30 ~ 3/30의 범위로 나타났다. 시추조사 결과는 그림 3.1의 지질주상도에 나타내었다.

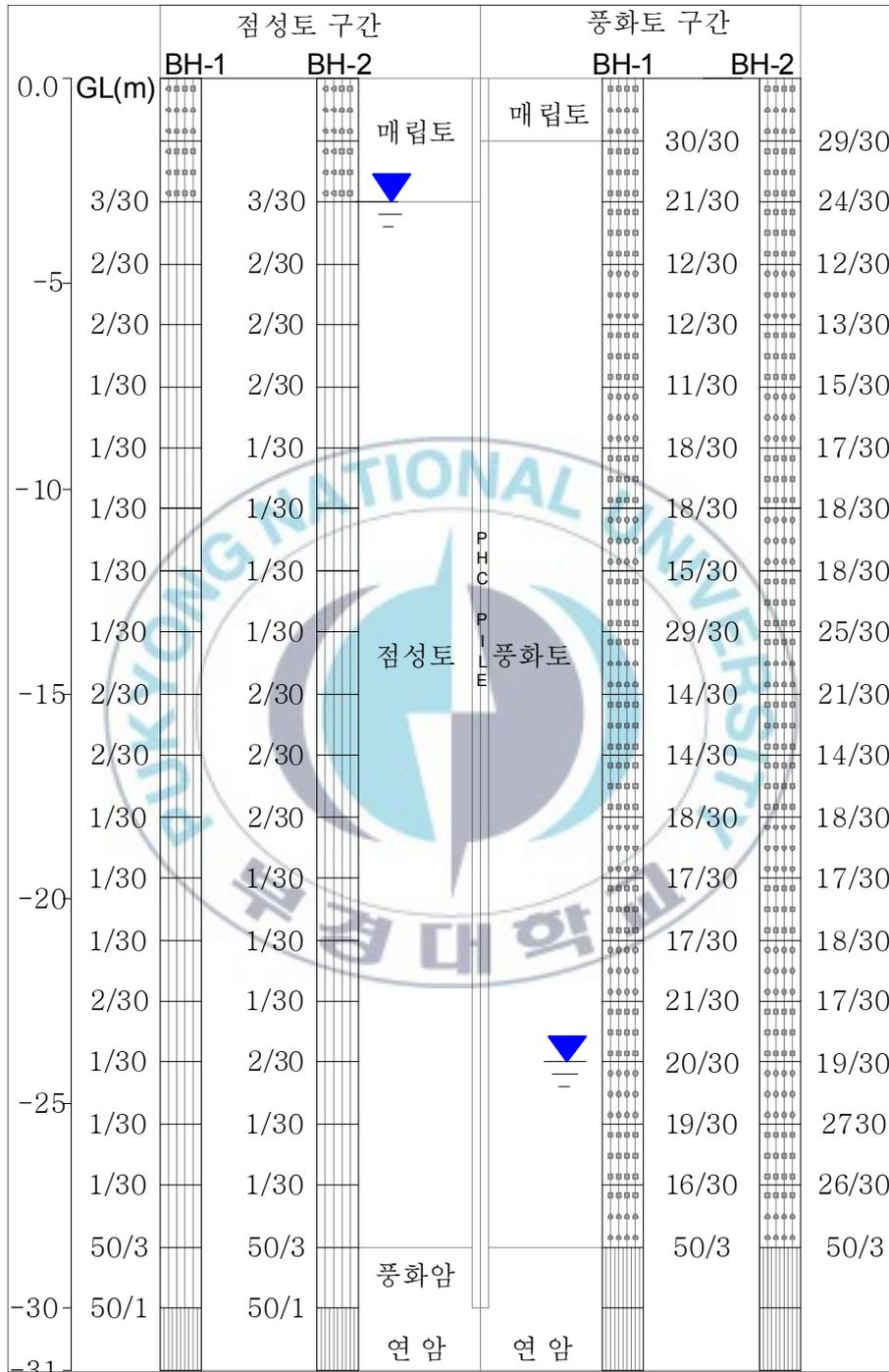


그림 3.1 지질 주상도

3.1.2 토질시험

실내시험에 사용된 흙 시료는 실제 말뚝이 설치되는 대표적인 시공위치를 설정하여 근접된 위치에 시추조사 8~10m시료를 취하여 시험하였고, 시험에 사용된 흙의 주요 물성치와 체가름 분석을 통한 입도분포곡선을 나타내었다.

현장조건을 최대한 유지하기 위해 시료의 함수비는 시험 전까지 밀폐시켜 현장의 자연함수비를 유지하였다.

1) 입도분포곡선

균등계수 및 곡률계수는 입경 분포의 넓이와 형상을 수치적으로 나타낸 지수이며 이들 값에 의하여 입도분포의 상태를 알 수 있다. 균등계수는 입도분포곡선의 기울기를 나타내는 것으로 $C_u=1$ 일 때에는 D_{60} 과 D_{10} 과의 범위가 좁아 입도분포곡선이 거의 직립함을 나타내며, C_u 가 커짐에 따라 입자 지름 분포가 넓은 것을 나타낸다. 일반적으로 C_u 가 4 이하의 흙은 입도 분포가 나쁘다고 말하고, 10 이상인 흙은 입도 분포가 좋다고 말할 수 있다. 곡률 계수는 입도 분포가 계단상인 경우에 이것을 정량적으로 나타내는 것으로 $C_g=1\sim3$ 은 입도 분포가 좋다는 것을 나타내고 있다. C_u 는 균등계수로서 입경이 고른 흙은 균등계수가 1에 가깝다. 입도 분포가 좋은 흙은 균등계수의 값이 크고 균등계수가 1에 가까우면 동일한 입경의 토립자로 이루어진 흙으로 볼 수 있다. 사질토에서는 $C_u>10$ 이면 양입도, $C_u<4$ 이면 빈입도로 판단한다. C_g 또는 C_u 는 곡률 계수로서 $1<C_g<3$ 이면 양입도라 한다. 이 시험에서 점성토와 풍화토에 대하여 대표시험을 한 결과 그림 3.2 그림 3.3 그래프와 같이 얻었다.

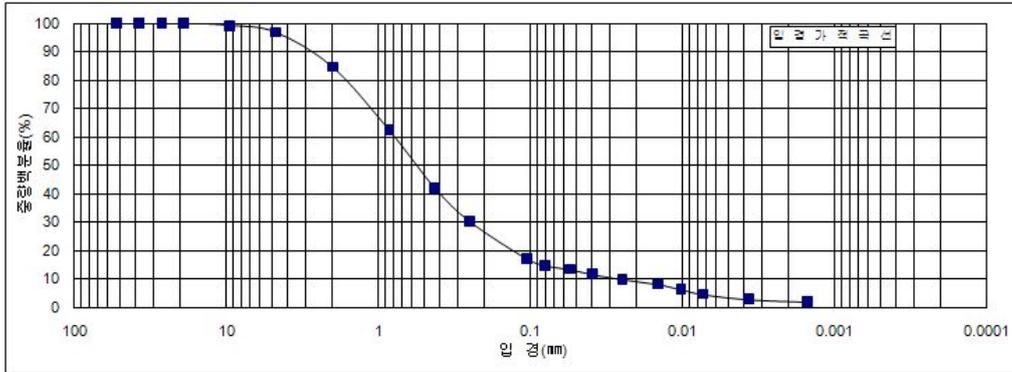


그림 3.2 풍화토시료 입도분포곡선

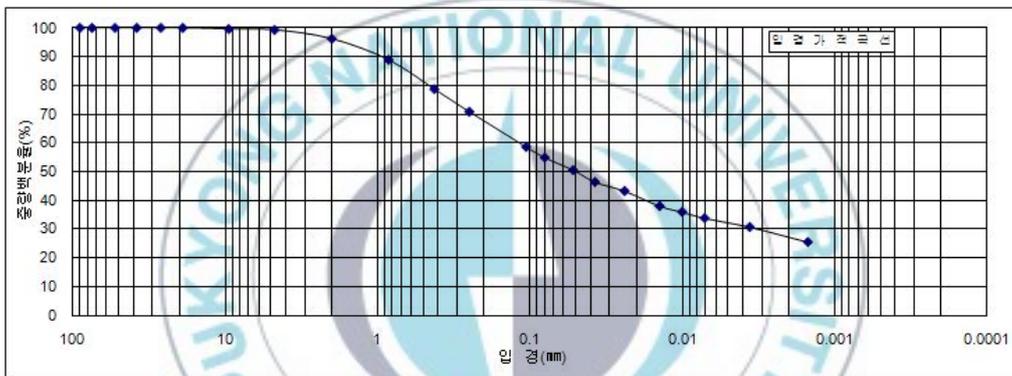


그림 3.3 점성토시료 입도분포곡선

2) 유동곡선

유동곡선은 반대수 용지의 대수 눈금의 가로축에 낙하 횟수 15, 19, 28, 34를 산술 눈금의 세로축에 함수비를 취하여 위에서 구한 결과를 도시하여 이들을 대표할 수 있는 직선을 구하여 이를 유동곡선으로 하고, 이 선의 기울기를 유동 지수라고 한다. 이 시험에서 점성토와 풍화토에 대한 대표 시험을 하여 그림 3.4, 그림 3.5와 같은 그래프를 얻었다.

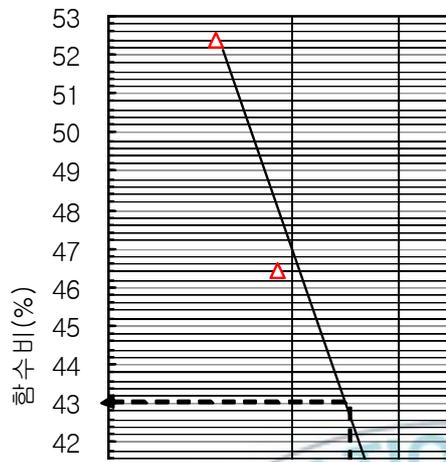


그림 3.4 풍화토 유동곡선

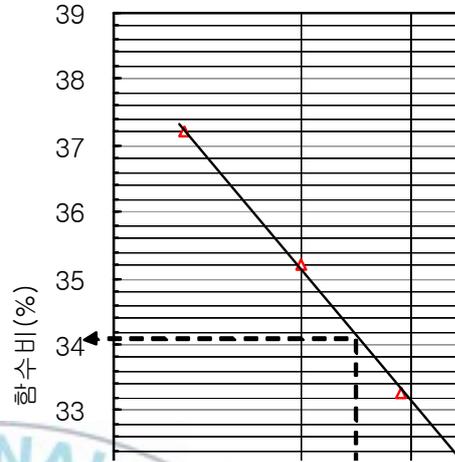


그림 3.5 점성토 유동곡선

3) 흙의 물성치는 풍화토와 점성토로 구분하여 표 3.1와 같이 나타냈다

표 3.1 시료의 물성치

구분	토질분류	평균함수비	액성한계	소성한계	소성지수
풍화토	SC	20%	34.1	20.6	13.5
점성토	CH	22.6%	39.7	22.6	17.1

4) 흙의 역학특성을 위해 풍화토는 직접전단시험과 점성토는 비압밀비배수 삼축압축시험(UU)을 실시하였으며, 그 결과를 표 3.2에 나타내었다.

표 3.2 시료의 전단특성값

구분	비중	내부마찰각(°)	점착력(N/mm ²)	비고
풍화토	2.70	32	0.42	직접전단시험
점성토	1.98	0	0.023	UU시험

3.1.3 주입용 시멘트 밀크 배합

배합비는 일반 토사층에서는 표준배합비를 사용하며 연약한 점토층이나 느슨한 지반에서는 부배합을 적용하는 것이 타당하다. 부배합은 시멘트량을 50%이상 할증한 것으로 이때, 물-시멘트비(w/c)가 50%이상 되어야 압송 주입이 가능하며, 이 실험에서는 표준배합비를 사용하였다.

표 3.3 시멘트 밀크 배합비(m³)

구분	물(kg)	시멘트(kg)	벤토나이트(kg)	W/C
선단 및 주면고정액	680	1000	2	68%

3.2 시험방법

3.2.1 시험 시공

PHC 말뚝(직경 400mm, 두께 65mm, 말뚝길이 30m, 관입길이 29m, 노출 1m) 5분을 1조 4개 그룹으로 하여, 점성토 2조, 풍화토 2조로 총 20분을 구분하여 시멘트 밀크를 주입 여부에 따라 구분 시공계획을 세웠고, 시험천공 깊이는 지질조사를 통하여 점성토 구간은 풍화암 상단 30m, 풍화토 구간은 연암 상단 30m까지 천공하는 것으로 하였다.

현장시공 말뚝은 근입 깊이를 알기위해 1m 간격으로 표시, 말뚝길이 15m 2분을 용접, 전장 30m로 시험말뚝을 이음하고, 용접부는 비파괴 검사를 통하여 용접이음의 품질관리를 하였다. 시험위치는 측량을 통하여 사전 표식을 하고, 천공장비를 정 위치에 고정시켜 소음과 진동을 최소화 하기위해 저속으로 운행시켰다. 해머의 낙하고를 일정하게 유지시키기 위하여

크레인 리드(Crane lead)에 높이 표시를 하고 눈으로 검측이 가능하도록 하였다. 오거 천공하는 과정에서도 실제 지질조사와 일치하는지 여부를 알기 위해 오거의 회전부하 정도, 배토되는 토사를 관찰하면서 천공작업을 하였다. 실제 오거 천공한 결과 지질조사와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 천공직후 강한 압축공기로 선단부의 슬라임을 붙어내면서 오거를 인발 시키고 밀크주입은 케이싱 인발 전에 천공 길이의 절반정도 주입하여 말뚝을 삽입하였다. 시공순서를 정리하면 아래와 같고, 이를 도식적으로 나타내면 그림 3.6과 같다

- 1) 설계도면을 참조하여 시험시공 위치는 측량을 통해 선정하였다.
- 2) 오거와 케이싱이 조합된 장비를 선정 위치에 수직도를 유지 시키면서 천공 작업을 한다.
- 3) 소정의 깊이만큼 천공 케이싱은 두고 오거를 역회전시켜 인발한다.
- 4) 시멘트 밀크를 주입하고 말뚝을 자유 낙하시켜 삽입한다.
- 5) 케이싱을 인발하고 드롭해머를 말뚝을 경타한다.

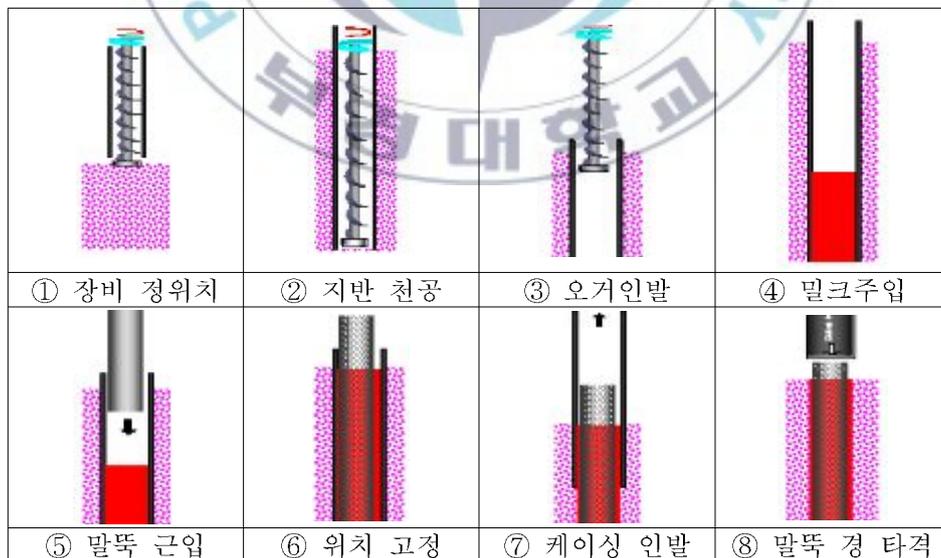


그림 3.6 시험 시공 순서도

3.2.2. 현장재하시험

선 굴착 말뚝의 주변마찰력을 시간 경과에 따라 구하는 방법은 말뚝 인발방법과 동재하시험 방법이 있는데 인발방법을 적용할 경우에는 인발변위로 인한 추가 항타 작업등이 소요되어 동적 재하시험에 의한 방법으로 시험하여 구하기로 하였다. 이 연구에서는 TNO사의 PDA/DLT WAVE시험기를 이용하여 드롭해머 무게 30kN, 높이 3m에서 말뚝 두부에 자유낙하 시켜 동적에너지를 가한다. PDA 시험기와 가속계 변형율계 2조를 대칭으로 그림 3.7과 같이 설치하여 동적재하시험에 의한 말뚝지지력을 평가하였다. 시험방법은 재항타 시험간격은 교란된 흙의 강도회복 및 주입되는 시멘트 밀크의 재령을 고려하여 시공 직후, 3일, 7일, 21일, 그리고 28일 간격으로 설정하여 시험하였다.

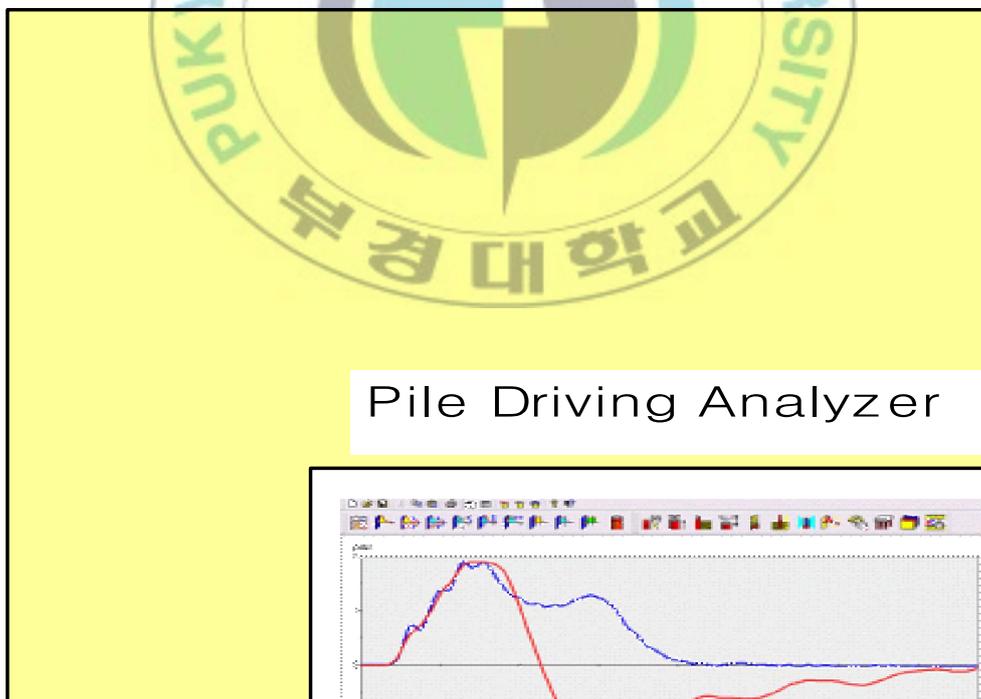


그림 3.7 말뚝항타분석기의 구성도

4. 시험결과

4.1 점성토 지반

점성토 지반에서의 말뚝 동재하시험은 시멘트 밀크를 주입하지 않은 경우와 주입한 경우로 구분하여 실시하였으며, 시험결과는 다음과 같다.

4.1.1 시멘트 밀크 미 주입

a) 시공 직 후

시공 직후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.1에 나타난 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 99.5%, 주변마찰력 0.5%로 나타났다.

표 4.1 시공 직 후 점성토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 미 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	2.291	99.18	0.019	0.82	2.310
2번	2.214	99.60	0.009	0.40	2.223
3번	2.213	99.59	0.009	0.41	2.222
4번	2.214	99.51	0.011	0.49	2.225
5번	2.210	99.64	0.008	0.36	2.218
평균	2.228	99.50	0.011	0.50	2.239

b) 3일 경과 후

3일이 경과한 후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.2에 나타낸 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 82.0%, 주변마찰력 18.0%로 나타났다.

표 4.2 3일 경과 후 점성토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 미 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	1.758	81.92	0.388	18.08	2.146
2번	1.757	81.61	0.396	18.39	2.153
3번	1.756	82.71	0.367	17.29	2.123
4번	1.758	82.81	0.365	17.19	2.123
5번	1.758	81.43	0.401	18.57	2.159
평균	1.757	82.09	0.383	17.91	2.140

c) 7일 경과 후

7일이 경과한 후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.3에 나타낸 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 75.3%, 주변마찰력 24.70%로 나타났다.

표 4.3 7일 경과 후 점성토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 미 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	1.658	78.95	0.442	21.05	2.100
2번	1.637	74.95	0.547	25.05	2.184
3번	1.618	74.67	0.549	25.33	2.167
4번	1.618	74.20	0.563	25.80	2.182
5번	1.619	73.72	0.561	26.28	2.135
평균	1.621	75.30	0.532	24.70	2.153

d) 21일 경과 후

21일이 경과한 후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.4에 나타낸 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 70.8%, 주변마찰력 29.2%로 나타났다.

표 4.4 21일 경과 후 점성토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 미 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	1.621	71.22	0.655	28.78	2.276
2번	1.601	70.75	0.662	29.25	2.263
3번	1.542	71.32	0.620	28.68	2.162
4번	1.548	70.65	0.643	29.35	2.191
5번	1.523	69.93	0.655	30.07	2.178
평균	1.567	70.77	0.647	29.23	2.214

e) 28일 경과 후

28일이 경과한 후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.5에 나타낸 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 67.5%, 주변마찰력 32.5%로 나타났다.

표 4.5 28일 경과 후 점성토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 미 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	1.537	67.03	0.756	32.97	2.293
2번	1.524	67.20	0.744	32.80	2.268
3번	1.521	67.18	0.743	32.82	2.264
4번	1.523	68.14	0.712	31.86	2.235
5번	1.524	67.81	0.417	32.19	2.274
평균	1.523	67.47	0.418	32.53	2.266

시멘트 밀크를 주입하지 않은 상태의 점성토 지반에서 실시한 PHC 말뚝의 동재하시험 결과를 토대로 선단지지력과 마찰력 분담률의 경시변화를 비교하면 그림 4.1과 같다. 시공 직후에는 말뚝 지지력의 대부분이 선단저항에 의하여 발휘되지만 시간이 경과할수록 말뚝의 선단지지력 분담률은 감소하는 반면에 마찰력 분담률은 증가하는 것으로 나타났다. 또한 선단지지력과 마찰력 분담률은 말뚝 시공 후 7일까지는 큰 증감이 있었으나, 7일 이후에는 증감률이 둔화되어 28일이 경과한 후 최종 분담률은 선단지지력이 67.5%, 주변마찰력은 32.5%로 나타났다.

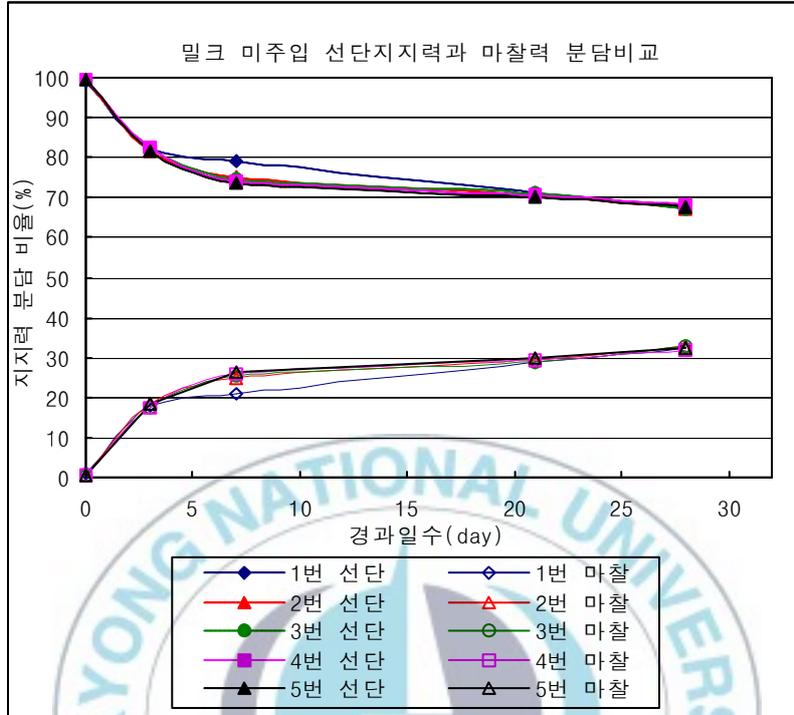


그림 4.1 점성토지반에서 말뚝지지력 분담률 경시변화 (시멘트 밀크 미 주입)

4.1.2 시멘트 밀크 주입

a) 시공 직 후

시공 직후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.6에 나타낸 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 99.47%, 주변마찰력 0.53%로 나타났다.

표 4.6 시공 직 후 점성토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	2.201	99.19	0.018	0.81	2.219
2번	2.214	99.55	0.010	0.45	2.224
3번	2.215	99.46	0.012	0.54	2.227
4번	2.211	99.46	0.012	0.54	2.223
5번	2.221	99.69	0.007	0.31	2.228
평균	2.221	99.47	0.012	0.53	2.225

b) 3일 경과 후

3일이 경과한 후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.7에 나타낸 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 80.3%, 주변마찰력 19.74%로 나타났다.

표 4.7 3일 경과 후 점성토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	1.768	78.82	0.475	21.18	2.243
2번	1.887	84.28	0.352	15.72	2.239
3번	1.754	78.97	0.467	21.03	2.221
4번	1.756	78.96	0.468	21.04	2.224
5번	1.794	80.27	0.441	19.73	2.235
평균	1.791	80.26	0.441	19.74	2.233

c) 7일 경과 후

7일이 경과한 후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.8에 나타낸 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 71.79%, 주변마찰력 28.21%로 나타났다

표 4.8 7일 경과 후 점성토 기반에서의 지지력(시멘트 밀크 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	1.574	69.83	0.680	30.17	2.254
2번	1.563	71.80	0.614	28.20	2.177
3번	1.574	72.07	0.610	27.93	2.184
4번	1.601	72.67	0.602	27.33	2.203
5번	1.599	72.58	0.604	27.42	2.203
평균	1.582	71.79	0.622	28.21	2.204

d) 21일 경과 후

21일이 경과한 후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.4에 나타낸 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 68.47%, 주변마찰력 31.53%로 나타났다.

표 4.9 21일 경과 후 점성토 기반에서의 지지력(시멘트 밀크 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	1.564	69.05	0.701	30.95	2.265
2번	1.570	67.82	0.745	32.18	2.315
3번	1.515	68.24	0.719	31.76	2.264
4번	1.562	68.54	0.717	31.46	2.279
5번	1.587	68.70	0.717	31.30	2.310
평균	1.565	68.47	0.723	31.53	2.287

e) 28일 경과 후

28일이 경과한 후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.5에 나타낸 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 67.5%, 주면마찰력 32.5%로 나타났다.

표 4.10 28일 경과 후 점성토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	1.564	66.64	0.783	33.36	2.347
2번	1.571	66.20	0.802	33.80	2.373
3번	1.544	66.70	0.771	33.30	2.315
4번	1.562	67.07	0.767	32.93	2.329
5번	1.587	67.27	0.772	32.73	2.329
평균	1.566	66.78	0.779	33.22	2.345

시멘트 밀크를 주입한 상태의 점성토 지반에서 실시한 PHC 말뚝의 동재하시험 결과를 토대로 선단지지력과 마찰력 분담률의 경시변화를 비교하면 그림 4.2와 같으며, 말뚝의 지지력 분담률 변화추이는 시멘트 밀크를 주입하지 않은 경우와 유사하게 나타났다. 시멘트 밀크를 주입한 상태에서도 시공 직후에는 말뚝 지지력의 대부분이 선단저항에 의하여 발휘되지만 시간이 경과할수록 말뚝의 선단지지력 분담률은 감소하는 반면에 마찰력 분담률은 증가하는 것으로 나타났다. 또한 선단지지력과 마찰력 분담률은 말뚝 시공 후 7일까지는 큰 증감이 있었으나, 7일 이후에는 증감률이 둔화되었고 28일이 경과한 후 최종 분담률은 선단지지력이 66.78%, 주면마찰력은 33.22%로 나타났다.

또한 미 주입상태 선단지지력 분담률 67.5%, 주면마찰력 분담률 32.5%와 비교 하여 볼 때 점성토 지반에서는 시멘트 밀크 주입에 따른 주면마찰

력 증대 효과는 거의 없는 것으로 나타났다.

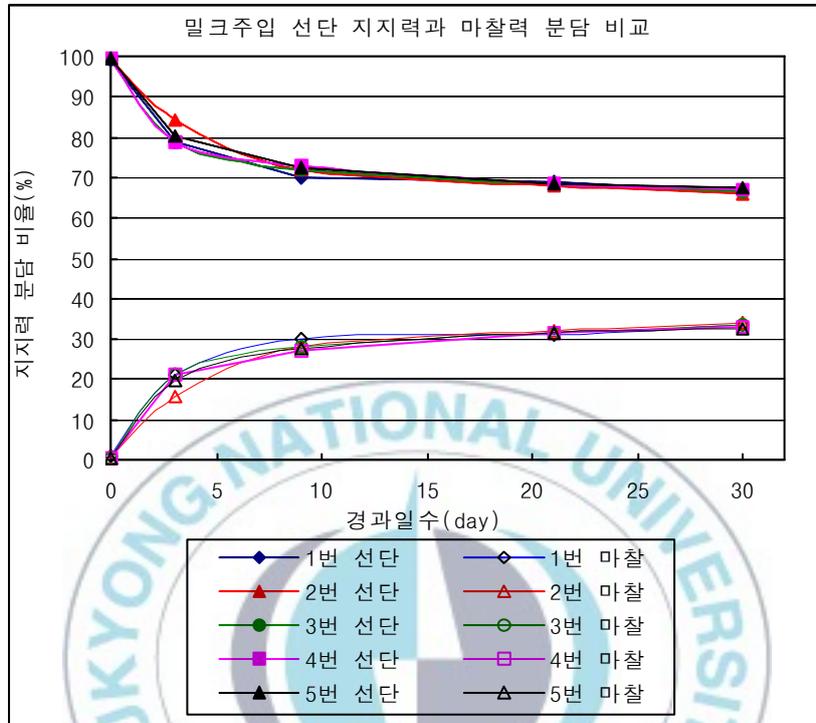


그림 4.2 점성토지반에서 말뚝지지력 분담률 경시변화 (시멘트 밀크 주입)

4.2 풍화토 지반

풍화토 지반에서의 말뚝 동재하시험도 점성토 지반에서의 시험과 동일한 방법을 적용하여 시멘트 밀크를 주입하지 않은 경우와 주입한 경우로 구분하여 실시하였으며, 시험결과는 다음과 같다.

4.2.1 시멘트 밀크 미 주입

a) 시공 직 후

시공 직후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.11에 나타낸 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 84.5%, 주변마찰력 15.5%로 나타났다.

표 4.11 시공 직 후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 미 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	1.945	84.93	0.345	15.07	2.290
2번	1.965	83.97	0.375	16.03	2.340
3번	1.916	83.20	0.387	16.80	2.303
4번	1.905	85.58	0.321	14.42	2.226
5번	1.905	85.08	0.344	14.92	2.239
평균	1.937	84.55	0.353	15.45	2.279

b) 3일 경과 후

3일이 경과한 후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.2에 나타낸 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 83.02%, 주변마찰력 16.98%로 나타났다.

표 4.12 3일 경과후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 미 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	1.944	82.97	0.399	17.03	2.343
2번	1.955	82.98	0.401	17.02	2.356
3번	1.906	82.58	0.402	17.42	2.308
4번	1.906	83.12	0.387	16.88	2.293
5번	1.906	83.45	0.378	16.55	2.293
평균	1.923	83.02	0.393	16.98	2.384

c) 7일 경과 후

7일이 경과한 후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.13에 나타낸 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 82.76%, 주변마찰력 17.24%로 나타났다.

표 4.13 7일 경과 후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 미 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	1.935	82.90	0.399	17.10	2.334
2번	1.953	82.93	0.402	17.07	2.355
3번	1.908	82.35	0.409	17.65	2.317
4번	1.911	82.26	0.412	17.74	2.323
5번	1.901	83.38	0.379	16.62	2.280
평균	1.921	82.76	0.400	17.24	2.321

d) 21일 경과 후

21일이 경과한 후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.14에 나타난 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 82.33%, 주변마찰력 17.67%로 나타났다.

표 4.14 21일 경과 후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 미 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	1.929	82.23	0.417	17.77	2.346
2번	1.931	82.45	0.411	17.55	2.342
3번	1.921	82.31	0.413	17.69	2.344
4번	1.935	82.34	0.415	17.66	2.350
5번	1.922	82.35	0.412	17.65	2.334
평균	1.927	82.33	0.414	17.67	2.341

e) 28일 경과 후

28일이 경과한 후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.15에 나타난 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 80.75%, 주변마찰력 19.25%로 나타났다.

표 4.15 28일 경과 후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 미 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	1.927	79.04	0.511	20.96	2.438
2번	1.951	82.56	0.412	17.44	2.363
3번	1.933	81.66	0.434	17.34	2.367
4번	1.926	79.82	0.487	20.18	2.413
5번	1.925	80.65	0.462	19.35	2.387
평균	1.932	80.75	0.462	19.25	2.393

시멘트 밀크를 주입하지 않은 상태의 풍화토 지반에서 실시한 PHC 말뚝의 동재하시험 결과를 토대로 선단지지력과 마찰력 분담률의 경시변화를 비교하면 그림 4.3과 같다. 풍화토 지반의 경우 시공 직후 선단지지력 분담률은 84.5%, 마찰지지력 분담율은 15.5%로 점성토 지반에 비해서는 마찰지지력이 상당히 발휘되는 것으로 나타났다. 또한 점성토 지반의 경우 선단지지력과 마찰력 분담률이 말뚝 시공 후 7일까지는 큰 증감이 있었으나, 풍화토 지반에서는 상대적으로 증감률의 변화가 크게 발생하지 않는 것으로 나타났고, 28일이 경과한 후에도 최종 분담률은 선단지지력이 80.75%, 주변마찰력은 19.25%로 큰 증감이 없었다.

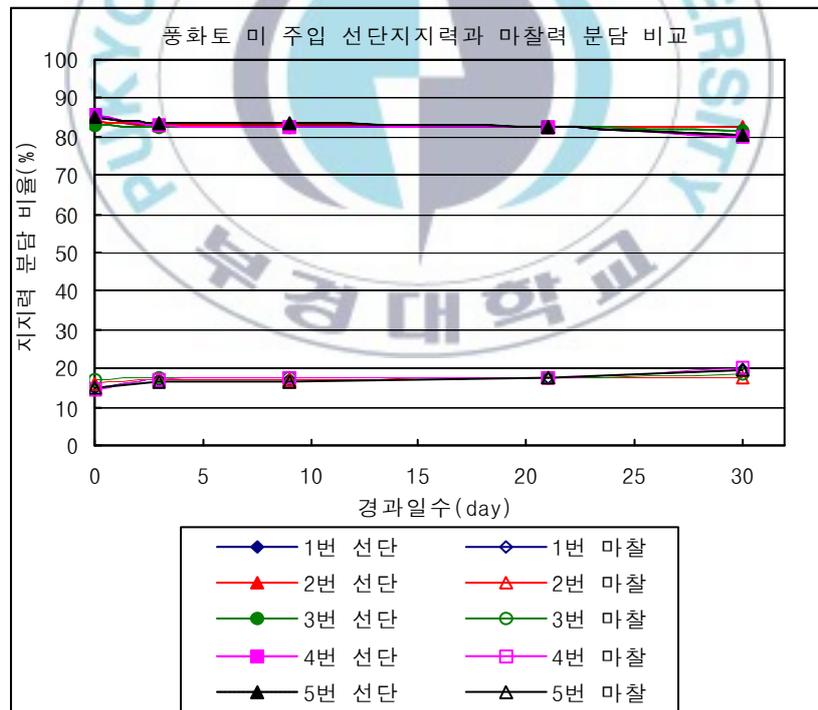


그림 4.3 풍화토지반에서 말뚝지지력 분담률 경시변화 (시멘트 밀크 미 주입)

4.2.2 시멘트 밀크 주입

a) 시공 직 후

시공 직후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.16에 나타낸 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 99.5%, 주변마찰력 0.5%로 나타났다.

표 4.16 시공 직 후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	2.112	99.15	0.018	0.85	2.130
2번	2.113	99.53	0.010	0.47	2.123
3번	2.115	99.44	0.012	0.56	2.127
4번	2.117	99.44	0.012	0.56	2.129
5번	2.115	99.67	0.007	0.33	2.122
평균	2.112	99.45	0.012	0.55	2.124

b) 3일 경과 후

시공 직후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.17에 나타낸 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 74.46%, 주변마찰력 25.54%로 나타났다.

표 4.17 3일 경과 후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	1.678	75.08	0.557	24.92	2.235
2번	1.675	74.88	0.562	25.12	2.237
3번	1.679	74.26	0.582	25.74	2.261
4번	1.678	74.05	0.588	25.95	2.266
5번	1.677	74.04	0.588	25.96	2.265
평균	1.677	74.46	0.575	25.54	2.253

c) 7일 경과 후

7일이 경과한 후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.18에 나타난 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 60.76%, 주변마찰력 39.24%로 나타났다.

표 4.18 7일 경과 후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	1.394	61.36	0.878	38.64	2.272
2번	1.387	60.99	0.887	39.01	2.274
3번	1.389	60.73	0.898	39.27	2.287
4번	1.386	61.03	0.885	38.97	2.271
5번	1.388	59.70	0.937	40.30	2.325
평균	1.388	60.76	0.897	39.24	2.285

d) 21일 경과 후

21일이 경과한 후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.19에 나타난 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 33.86%, 주변마찰력 66.14%로 나타났다.

표 4.19 21일 경과 후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	0.725	32.60	1.499	67.40	2.224
2번	0.724	32.73	1.488	67.27	2.212
3번	0.723	32.92	1.473	67.08	2.196
4번	0.745	33.59	1.473	66.41	2.218
5번	0.874	37.48	1.458	62.52	2.332
평균	0.758	33.86	1.478	66.14	2.236

e) 28일 경과 후

28일이 경과한 후 실시한 동재하시험 결과에 의하면 표 4.20에 나타난 바와 같이 시험말뚝의 지지력 분담률은 선단지지력 30.99%, 주변마찰력 69.01%로 나타났다.

표 4.20 28일 경과 후 풍화토 지반에서의 지지력(시멘트 밀크 주입)

말뚝번호	선단지지력		마찰지지력		총지지력(MN)
	하중(MN)	분담율(%)	하중(MN)	분담율(%)	
1번	0.669	30.33	1.537	69.67	2.206
2번	0.659	30.62	1.493	69.38	2.152
3번	0.668	31.10	1.480	68.90	2.148
4번	0.656	30.54	1.492	69.46	2.148
5번	0.701	32.38	1.464	67.62	2.165
평균	0.671	30.99	1.493	69.01	2.164

시멘트 밀크를 주입한 상태의 풍화토 지반에서 실시한 PHC 말뚝의 동재하시험 결과를 토대로 선단지지력과 마찰력 분담률의 경시변화를 비교하면 그림 4.4와 같으며, 시멘트 밀크를 주입하지 않은 경우에 비해서 선단지지력과 마찰지지력 분담률의 변화추이가 크게 다른 양상으로 나타났다. 시멘트 밀크를 주입한 풍화토 지반의 경우 시공 직후 지지력 분담률은 선단지지력 99.5%, 마찰지지력 0.5%로 마찰지지력은 거의 발휘되지 않는 것으로 나타났다. 그러나 3일이 경과한 후부터 선단지지력은 크게 감소하는 반면에 마찰지지력은 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 이러한 증감 추이는 시공 후 경과시간 21일까지 계속되다가 21일 이후부터는 증감 추이가 둔화되어 28일이 경과한 시점에서는 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보이고 있다.

시험한 결과 그림 4.24와 같이 최종 선단지지력30.99% 주변마찰력69.01%로 마찰 지지력 분담추이21일까지는 증가하다가 그 이후로는 시간에 따른

지지력증가의 차이가 크지 않았다. 이 결과 미 주입 상태의 최종 선단지지력 80.7% 주면마찰력 19.3% 으로 주입 상태에서 최종 선단지지력 31.1% 주면마찰력 68.9% 비교해 볼 때 풍화토의 경우는 내부마찰각 32°, 점착력은 0.42 N/mm²로 흙의 내부마찰력과 점착력이 큰 관계로 천공 직경 감소효과는 그다지 발휘 하지 않았고, 지중응력 증가에 의한 지지력 증가보다 주면마찰력은 시멘트 밀크의 재령이 경과함에 따라 전적으로 의존한다고 판단된다.

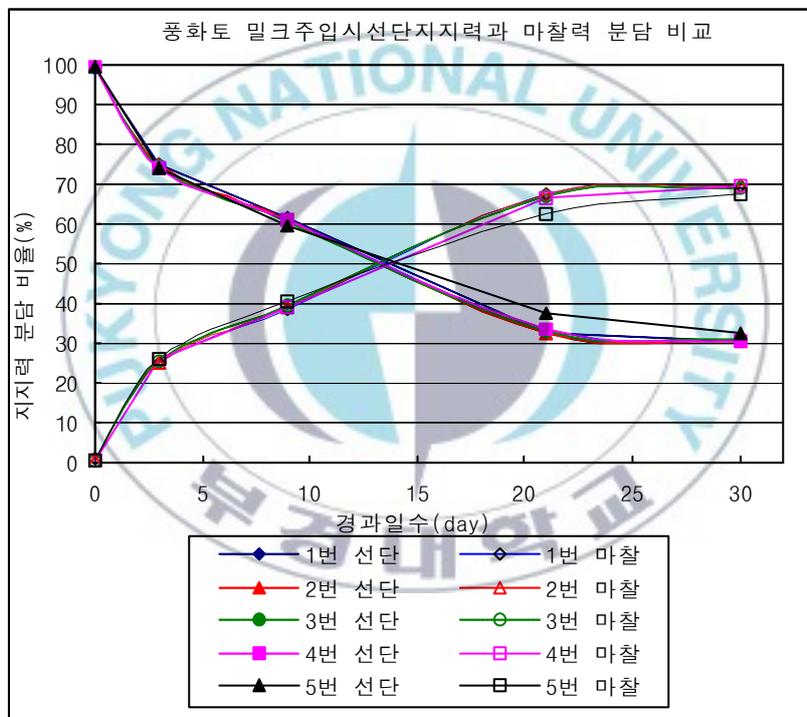


그림 4.4 풍화토지반에서 밀크 주입 시 분담비교

4.3 시험결과 분석

4.3.1 시멘트 밀크 주입 효과

그림 4.25는 점성토와 풍화토 지반에 설치한 천공 PHC 말뚝에 대하여 시멘트 밀크 주입 여부에 따른 동재하시험을 통하여 평가한 마찰지지력의 시간경과에 따른 변화추이를 나타낸 것이다.

풍화토 지반에 설치한 PHC 말뚝의 경우 시멘트 밀크를 주입하지 않았을 때는 시공 직후의 마찰지지력이 크게 변화하지 않았으나, 주입한 경우에는 시간이 경과함에 따라 마찰지지력이 크게 증가하는 경향을 보여주고 있다.

점성토 지반의 경우 시멘트 밀크의 주입 여부에 따른 마찰지지력의 차이도 크지 않고 증가 추이도 유사하게 나타났다. 초기 마찰지지력이 7일까지는 다소 증가하지만, 그 이후로는 증가율이 둔화되어 일정한 값으로 수렴하는 경향으로 나타났다.

따라서 풍화토 지반의 경우 시멘트 밀크의 주입에 의한 마찰지지력 증대 효과가 크지만, 점성토 지반의 경우 시멘트 밀크 주입에 의한 마찰지지력 증대 효과는 경미한 것으로 판단된다.

4.3.2 상부 구조물 시공의 최적화 시기

그림 4.25에서 보이는 바와 같이 점성토에서는 시멘트 밀크의 주입 여부에 상관없이 시공 후 7일까지는 마찰지지력이 다소 증가하다가 그 이후로는 큰 증가가 없고, 풍화토에서는 시멘트 밀크를 주입한 경우 시공 후 21일까지 마찰지지력이 크게 증가함을 알 수 있다. 따라서 공사기간, 안정성, 경제성을 고려하여 상부 구조물 시공의 최적 시기는 점성토의 경우 마찰지지력의 증가 추이가 일정하게 도달하는 7일 정도로 추천하고, 풍화토에서는 시멘트 밀크를 주입하는 경우 재령이 지배적임으로 21일 이후 증가량이 일정해 지는 시점을 최적 시기로 추천한다.

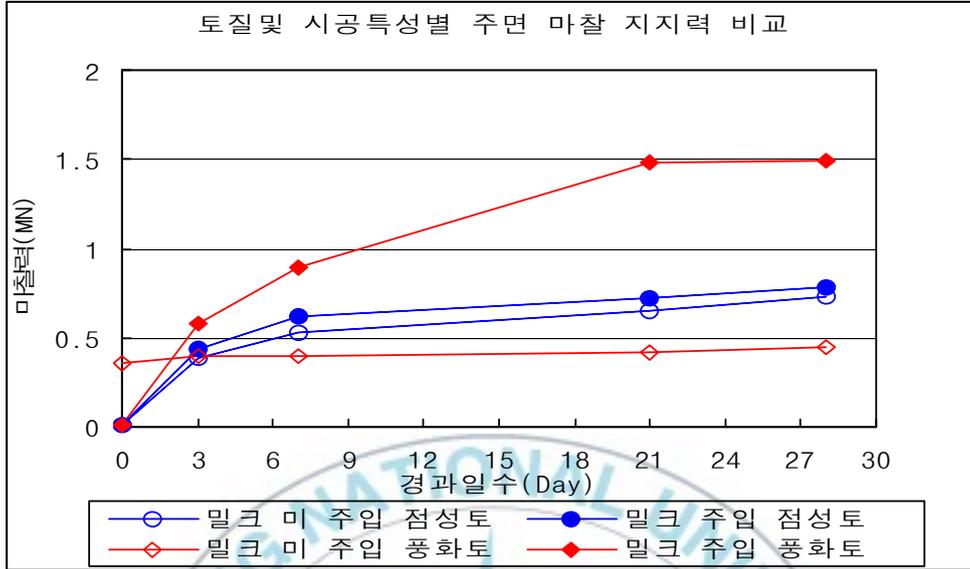


그림 4.5 주면 마찰력 비교



5. 결 론

이 연구에서는 선 굴착 PHC 말뚝의 시간경과에 따른 주변마찰력 거동을 동적재하시험을 통해 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 점성토 지반에서 시멘트 밀크를 주입한 상태에서 시험한 결과 선단지지력 66.8%, 주변마찰력 33.2%로 마찰 지지력 분단추이가 7일까지는 증가하다가 시간경과에 따른 지지력증가의 차이가 크지 않았다. 미 주입 상태 선단지지력 67.5%, 주변마찰력 32.5%로와 비교 하여 볼 때 점성토 지반에서는 시멘트 밀크 주입에 따른 주변마찰력 증대 효과는 적었다. 또한 점성토에서 주변마찰력 증가 차이만큼 지하수위 변화, 상재하중의 증가조건 등으로 부주면마찰력으로 작용할 수 있으므로 밀크 주입이 지지력효과에 대해서는 더 불리하다. 따라서 점성토 지반조건에서 심도가 깊을 경우 이 연구 결과와 함께 부마찰력의 영향까지 고려해서 시멘트 밀크주입은 가능한 하지 않아야 될 것으로 판단된다.
- 2) 풍화토에서 시멘트 밀크를 주입 상태에서 최종 선단지지력 31.1%, 주변마찰력 68.9%로 마찰 지지력 분단추이 21일까지는 증가하다가 그 이후로는 시간에 따른 지지력증가의 차이가 크지 않았다. 미 주입 상태에서 시험한 결과 최종 선단지지력 80.7%, 주변마찰력 19.3% 으로 주변마찰력 분단추이가 낮은 상태이다. 풍화토 경우는 내부마찰각 32°, 점착력은 0.42 N/mm^2 으로 흙 의 전단강도가 큰 관계로 천공붕괴 및 직경 감소 효과는 그다지 발휘 하지 않았고, 지중응력 증가에 의한 마찰력 증가보다 시멘트 밀크의 재령이 경과함에 따라 전적으로 의존한다고 판단된다.

- 3) 상부 구조물 시공 최적화 시기는 점성토일 경우 시멘트 밀크 주입 여부와 관계없이 시공 후 7일 이후에, 풍화토일 경우 시멘트 밀크 주입 후 21일 이후에 시공 할 것을 제안한다.

- 4) 이 연구 결과 선 굴착에 의한 말뚝의 설계 시공에서 일률적으로 시멘트 밀크 주입하는 것은 경제적 손실이며 토질 지하수위 등을 고려하여 결정해야 한다.



참 고 문 헌

- 건설교통부(1998) 이형 선 굴착 시멘트풀 주입 말뚝공법의 모형실험 연구 건설교통부.
- 대한주택공사(2001) SIP공법의 품질개선방안과 지지력 산정법 제안에 관한 연구, pp.79 ~ 80.
- 박종배 김정수 박부용(2003) SIP공법의 주변 마찰특성 및 경계용소의 수치모델에 관한 연구, (사)한국지반공학회제19권2호, pp247~254.
- 박종배 김정수 박부용(2003) 정동재하시험에 의한 SIP말뚝의 지지력평가, (사)한국지반공학회제19권2호 p2356~2358.
- 백규호 새로운 매입말뚝 공법의 지지력 특성, 한국지반공학회지 vol. 13, no. 4, pp.25 ~ 35.
- 백성훈 (2001),현장조사에 의한 부산점토의 토질특성, pp.54 ~ 65.
- (사)한국지반공학회(2009) 구조물 기초 설계기준 동적재하시험, pp.256.
- 이명환 (1994) 저공해 말뚝공법의 지지력 특성 및 시공관리, 토지개발기술 번호, pp.34 ~ 45, 한국토지개발공사.
- 이성준 정상섭 고준영 (2010) 부주면마찰력을 고려한 단말뚝의 허용지지력 공식분석,(사)한국지반공학회제26권, 제8호 pp29~30.
- 이인모 최유중 이우진 권장혁 (1995) SIP 말뚝의 지지력특성, 대한토목학회 학술발표회 논문집 제3권, pp399~402.
- 임종성 문장수 김세환 김상훈 (1997) SIP공법의 지지력 증대에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집 제3권, pp579~582.
- 천병식 임해식 (2003) SIP공법의 주변 마찰특성 및 경계용소의 수치모델에 관한 연구, (사)한국지반공학회제19권2호 pp247~254.
- 채수근(2003) 매입말뚝 시공법, 건축구조기술사회, pp21.

Chin, F,K(1970), “Estimation of the Ultimate Load of Pile not carried to Failure” ,Proceedings 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Singapore, pp.81~90.

Chin, F,K, and Vail A.J(1973), “Behavior of Pile in alluvium” ,Proc. Eighth Int. conf.on Soil Mech. and found. Engrg., Moscow, Soviet Union, pp.47~52.

Meyerhof, G.G. (1976) Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundation, J. Geotech Engineering Div. ASCE, Vol.102, No. GT 3, March 1976, pp.197~228.

NAVFAC (1982), Soil Mechanics Design Manual Department of the Navy Facilities Engineering Command, pp. 7.2.192~7.2.196.

Neely, W. J.(1991), “Bearing Capacity of Auger-Cast Pile in sand ” , Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.117, No2, pp.311-345.

Robertson, P.K. Campanella R.G(1983), “SPT-CPT correlations” ,Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.109, No.11, pp. 1449~1459.

Roscoe, G. H.(1983) “The behaviour of flight auger bored pile in sand ” , piling and Ground Improvement, pp.241-250.

Skempton(1951) - Skempton, A.W(1951), “The Bearing Capacity of Clays” , Building Research Congress, pp.180-189.

TNO사 (2001) PDA/ DLT WAVE(2001) 네덜란드.

Tomlinson, M.F.(1957), “The Adhesion of Pile Driven in Clay Soils ” ,4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.66-77.

감사의 글

이 논문이 완성되기까지 세심한 지도와 배려를 베풀어주신 이환우 교수님께 진심으로 고개 숙여 감사드리며, 따뜻한 충고와 조언을 아끼지 않고 논문을 심사해 주신 정두회 교수님 이영대 교수님께 깊이 감사드립니다. 그리고 열정적으로 강의 해주신 장희석 교수님, 이종섭 교수님, 이동욱 교수님, 김명식 교수님께도 감사의 마음을 전합니다.

늦게나마 대학원 진학이라는 결정을 내리기까지는 많은 용기와 결단이 필요했으나 망설임 과정에서 독려 해주신 이상만 선배에게 감사드립니다. 또한 현장실험 과정에서 도움을 주신 여러 건설회사 관계자 분과, 특히 적극 협조해주신 성구건설(주) 김영환 사장님께도 감사드립니다.

20여년 실무를 하면서 이론적 배경정립이 부족하였던 것을 대학원 과정을 거치면서 다소나마 채울 수 있는 계기가 되었고, 무엇보다 가장 소중한 것은 훌륭한 교수님을 비롯하여 구조설계 연구실의 여러 선·후배님을 알게 된 것을 기쁨으로 생각하며 특히 학문적 의문에 대한 토의에 성심 성의로 대하여 주신 강호준님 장재엽님께 더 없는 감사를 드립니다.

그리고 당신이 부족했던 배움의 모자람을 되물림 하지 않으시려고 학문에 애착이 많으셨고 장남에 대한 기대가 누구보다도 크셨든 하늘에 계신 아버지 장경대 항상 아들이 잘되기만을 기원하셨던 어머니 최복임에게도 이 논문을 바칩니다.

끝으로 그동안 학업은 물론 각종 자격증 취득과 사업에 열중 할 수 있도록 잘 내조해준 나의 아내 박선희에게도 이 논문을 바치며 나의 사랑하는 딸 소영 아들 우성이 와 함께 이 기쁨을 나누고자 합니다.

2011. 7. 張 星 斗