

RPUM 강관의 효율적인 설계기법에 관한 연구

A Study on Efficient Design Technique of RPUM Steel Pipes

*김 정 수 ** 박 태 순
Kim Jung Su, Park Tae Soon

ABSTRACT

Until now, NATM(New Austrian Tunneling Method) has been increasingly developed based on concept of making use of ground as support. Also, NATM in its essence is a method of risk based on monitoring behaviour of tunnel. This Monitoring is irreplaceable for the quality construction of tunnel, and safety of tunnel itself. Pre-reinforcement ahead of a tunnel face using long steel pipes in NATM, known as the RPUM(Reinforced Protective Umbrella Method), is the auxiliary method to sustain the stability of a tunnel face and reduce the ground settlements. Since design of RPUM has been dependent on the empirical design, it is necessary to develop the improved design methods. In this study, to understand behaviour of steel pipes, it is monitored displacement of tunnel crown, axial force of rock bolt, displacement and axial stress of steel pipes. Also, in order to clarify the mechanical behaviour and RPUM effects, 3-Dimensional numerical analysis is performed that various cases of different parameter combinations including original length and repeated length of steel pipes, installation width and angle, repeated length of steel. In the results of comparison monitoring with analysis, it is suggested more economical and efficient design technique than empirical design methods.

1. 서 론

최근 인구증가로 인한 도심지의 발달로 인하여 여러 문제점이 발생하고 있으며, 이를 해결하기 위하여 사회간접자본의 건설이 추진되어 왔다. 도심지에서 지하구조물의 건설은 시공조건이 매우 열악하기 때문에 건설시 발생할 수 있는 인접구조물 손상 및 붕괴사고는 인명, 시간 및 경제적인 손실을 초래할 수 있어, 지하구조물, 인근 지상 구조물 및 주변 지반의 안정성 문제가 중요시 되고 있다. 이러한 이유로 열악한 시공조건을 극복하고 지하 구조물을 구축할 수 있는 경제적이고 안정적인 시공방법의 선정이 매우 중요한 사안이 된다. 특히 경제성이 중요시되는 지하철 터널의 경우 터널 노선은 불가피하게 토 피고가 낮거나 과쇄대 등의 연약한 지반을 통과하게 되므로 개착식 터널보다 NATM 등에 의한 굴착공법이 유리한 상황이 발생할 수 있다. 일반적으로 강도가 낮고 자립도가 낮은 지반에서 터널 굴착을 수행하는 경우, 또는 지하수위가 높아 지하굴착시 지하수 배출에 따른 주변지반의 침하가 예상되거나 연약지반으로 인해 굴착시 지반의 이완영역이 넓은 경우 등은 지하구조물 및 인접구조물의 안정성을 확보하기 위하여 굴착공법과 병행하여 적절한 보조공법을 계획하여야 한다.

본 논문에서는 기존의 경험적인 RPUM 공법의 설계인자에 대하여 매개변수 해석 및 현장계측결과를 이용하여 기존 설계에 의한 단면과 유사한 거동을 나타내고 경제성에 있어서 효율적인 단면을 제안하는 방안에 대하여 연구하였다.

* 김정수, 정회원, 서울시 지하철건설본부 설계관리부

E-mail : kjssu@seoul.go.kr

TEL : (02)772-7156 FAX : (02)772-7304

* 박태순, 서울산업대학교 교수

2. RPUM(Reinforced Protective Umbrella Method) 공법

터널 보조공법은 터널 시공의 안정성 확보, 주변환경의 보전효과가 기대된다. 터널 시공의 안정성 확보 측면에서는 막장안정대책과 용수대책 등이 있으며, 주변환경의 보전측면에는 지표면 침하대책, 근접 구조물 대책, 용수대책 등이 있다. RPUM 공법은 주로 막장안정대책, 지표면 침하대책, 근접구조물 대책 등으로 그 효과를 발휘하는 공법이며, 시공의 기계화 및 합리화를 촉진하기 위해 많은 공법이 개발·채용되었으며, 시공실적이 급증하고 있다. 이 공법은 터널 굴착에 앞서 터널 주위에 아치형으로 지반 개량체를 형성함으로써 막장 전방 지반을 보강하는 길이가 긴 포어폴링 공법이며, 지반의 선행변위 억제, 지반의 느슨함 방지, 시공의 안전성 확보 등을 주요 목적으로 하여 실시된다. RPUM 공법은 지반 상태, 천공방식이나 주입방식을 조합함으로써 지반조건에 적절한 여러 가지 시공패턴 선택이 가능하다.

2.1 강관보강 다단그라우팅 공법

강관보강 다단그라우팅 공법은 대구경 강관보강 그라우팅 공법과 유사한 공법으로 강관에 의한 지반 보강 효과와 그라우팅에 의한 보강 및 차수효과를 동시에 얻는 공법이다. 이 공법은 터널 굴착전에 소구경 강관을 적절한 형상으로 배열, 설치하고 그 강관의 내측에 패커를 설치하여 그라우트재를 주입함으로써 주입재에 의한 지반의 고결에 인하여 강관과 지반을 일체로 만들고 강관 및 주변지반의 보(Beam)작용에 의해 터널에 가해지는 상재하중, 토압 등의 분산효과 및 경감효과를 얻는다. 또한 주입 시 물유리와 시멘트를 주 주입재로 이용하므로 차수효과 및 보강효과를 동시에 얻을 수 있다.

파이프루프 공법 및 일반 그라우팅 공법을 일련의 단일공정으로 시공하는 공법으로서 터널 굴착전에 지보재를 설치하여 상부 토압 및 이완영역 경감효과를 얻고 또한 주입재에 의한 지반의 보강으로 각 강관사이에 간격이 있다 할지라도 흙의 전단강도를 증가시켜 지지할 수 있으며 주입을 강관 속에서 수행하므로 시공성 및 경제성 측면에서 매우 유리한 공법이다.

2.2 트레비 제트 그라우팅 공법

트레비 제트 그라우팅 공법은 대구경 강관보강 그라우팅 공법과 같이 이탈리아에서 개발, 실용화된 길이가 긴 포어폴링 공법이다. 강관에 의한 지반보강은 주입효과에 의해 좌우되고, 주입효과는 지반조건에 따라 일부 보강이 안된다는 염려가 있다. 또한, 제트 그라우팅에 의한 지반보강에서는 조성된 파일이 굴착 중에 절단된다든지, 파괴되는 등의 경우가 있다. 전자에 대해서는 균질한 보강을 할 필요가 있고, 후자에 대해서는 파일의 파괴 및 붕괴를 막기 위해 보강강관으로 시공하는 것이 필요하다. 이러한 점에 착안하여 트레비 제트 공법은 양자를 보강하는 개념에서 개발되었다. 트레비 제트공법은 제트 그라우팅 파일에 의한 지반보강과 강관에 의한 지반보강이 일체로 된 공법을 말한다.

이 공법은 대구경 강관보강 그라우팅 공법과 같이 천공타설 전용기에 의해 고압 경화재로 개량체를 조성하면서 천공하고 동시에 중심부에는 보강재인 강관을 타설함으로써 터널 외주부에 아치형 구조를 구축하여 우산형의 보강지역을 형성하는 것이다. 공극이 많은 지반에서는 보강강관을 이용한 2차 주입에 의해 공극이 충전되므로 보다 확실한 개량을 하는 것이 가능하다. 또한, 배토성을 고려하여 내관과 외관을 각각 반대방향으로 구동시키는 더블헤드 구조에 의해 천공타설 조성을 실시하므로 적용범위가 넓다. 타 공법에 비한 장점은 다음과 같다.

- (1) 천공하면서 조성할 수 있기 때문에 1사이클로 시공할 수 있다.
- (2) 강제적으로 지반을 개량하여 보강강관을 삽입시키기 때문에 보강효과가 높다.
- (3) 2차 주입을 실시하므로 조성체 확보 신뢰성이 향상된다.
- (4) 더블헤드구동에 의해 천공타설 조성을 하기 때문에 배토가 쉽고, 내압상승을 방지할 수 있다.
- (5) 천공타설 전용기를 사용하기 때문에 계획 길이를 확실하게 천공, 조성할 수 있다.
- (6) 보강강관은 12m 정도로 이음부가 없는 강관을 사용할 수 있기 때문에 작업효율이 높고, 강도 손실이 없다.
- (7) 두께가 두꺼운 강관을 사용할 수 있기 때문에 강성이 큰 개량지역을 조성할 수 있다.
- (8) 천공타설기 및 주입플랜트가 시스템화 되어 있어 시공성이 뛰어나다.

3. 현장 계측결과 분석

NATM 터널에서 계측은 주변지반의 거동 및 각 지보재의 역학적 거동 특성을 파악하여 당초 터널 설계 및 시공의 타당성을 검토하고 설계시 반영하지 못했던 사항에 대하여 시공 중 적절히 대응할 자료를 제공함으로써 안전하고 경제적인 터널 시공을 도모하는데 그 목적이 있다.

3.1 RPUM 강관의 계측

RPUM 강관에는 50cm의 간격으로 총 4개소의 변형률계(Strain Gauge)를 설치하여 변형률을 측정한 후 강관에 작용하는 응력을 알 수 있도록 하였고, 또한 RPUM 강관의 계측기가 매설된 단면에는 천단침하계를 함께 매설하도록 계획하였다. 이러한 계측기 매설 계획은 터널의 거동을 파악함에 있어 지보재 응력 및 터널 내공의 변위를 동시에 측정·분석함으로써 굴착시 터널 천단 이완하중이 지보재 및 터널 천단에 작용하는 과정을 파악할 수 있게 한다. 이러한 분석결과를 바탕으로 하여 다음 굴착 계획에 반영하는 경제적인 설계를 도모할 수 있다. Table.1과 Fig.1에는 계측기기 설치수량 및 설치상세를 나타내었다.

Table.1 Quantity of Monitoring Instruments

구분	위치	변형률계	천단침하계
터널 구간	24K+ 752.15	1	1
	24K+ 752.95	1	-
	24K+ 753.75	1	-
	24K+ 754.55	1	1
합계		4	2



Fig.1 Details of Installation of Instruments

3.2 수치해석과의 비교

본 연구에서 RPUM 강관의 매개변수 영향을 파악하기 위한 수치해석 프로그램은 (주)마이다스아이티에서 개발한 Midas/GTS 프로그램을 사용하였다. 수치해석 모델링은 터널단면형상, 지층의 분포, 굴착 및 시공순서, 지보재의 위치 및 강관의 위치를 고려하여 작성하였다. 단면은 RPUM 공법이 시공된 구간으로 상·하반 분할굴착 및 링컷 분할굴착 공법이 적용된 구간이다.

해석시 실제 현장의 현황을 정확히 모델링하기 위하여 도로 및 구조물 하중은 상재하중으로 고려하였으며, 터널 주변은 굴착시 응력의 변화가 크게 발생하므로 요소를 세분하고, 터널 진행방향의 강관의 설치를 위해서 요소의 간격을 시공시 1막장 이내로 설정하여 모델링 하였다. 또한 해석경계로 인한 오류를 없애기 위하여 좌우 경계는 터널 직경의 5배를 적용하여 해석하였다. 지보재는 슛크리트와 록볼트를 설치하였으며, 해석 후 터널의 연직변위, 록볼트 축력, RPUM 강관의 변위 및 축력을 계측값과 비교하였다. 시공단계별 3차원 수치해석을 수행하여 해석상 지반의 아칭현상을 충분히 반영하는 것으로 판단되어 2차원 해석시 고려하는 하중분담율은 적용하지 않았다.

수치해석의 입력정수인 설계지반정수는 기본 및 실시설계에서 적용한 Table.2에 나타내었다. 이 때 지반은 Mohr-Coulomb의 구성방정식을 만족하는 탄소성 재료로 가정하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 지반요소는 22,538개, 슛크리트 요소는 1,316개, RPUM 강관 및 록볼트는 1,908개가 사용하였다. Fig.2~4는 터널의 표준지보패턴 및 수치해석 요소망을 나타낸 그림이다.

Table.2 Input Parameters of Numerical Analysis

구 분	단위중량(tf/m^3)	탄성계수(tf/m^2)	포아송비	점착력(tf/m^2)	내부마찰각($^\circ$)
매립층	1.8	720	0.30	0.0	25
모래층	1.8	3,000	0.35	0.0	29
자갈층	2.2	10,000	0.35	0.0	36
풍화암	2.4	24,000	0.30	5.0	32
연 암	2.5	100,000	0.25	15.0	35
보통암	2.6	530,000	0.24	50.0	37

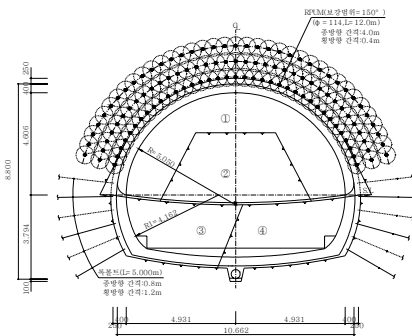


Fig.2 Standard Support Type

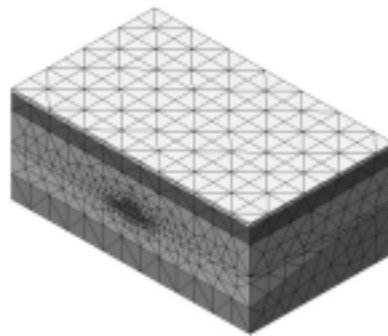


Fig.3 Numerical Modeling

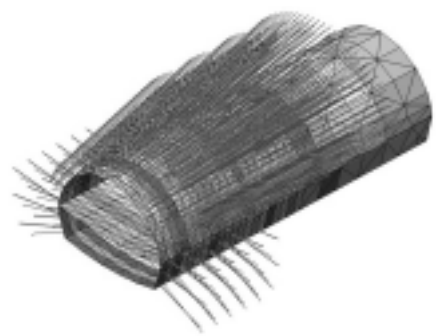


Fig.4 Tunnel Modeling

현장계측값 및 수치해석 결과를 Fig.5와 Fig.6에 나타내었다. 이 때, 수치해석과 현장계측 결과의 정성적인 경향을 파악하기 위하여 각 시공단계별로 해석 및 계측값을 정규화하여 나타내었다. 이렇게 정규화하여 도시하면, 각 시공단계에 따른 계측값의 추세를 비교할 수 있어 계측값과 해석값을 직접 비교하는 것보다 해석의 합리성을 쉽게 파악할 수 있다. 도시한 결과 시공단계에 따른 터널 천단변위 및 강관 축력의 발생은 해석결과와 비교적 일치하여 수치해석 프로그램은 시공단계에 따른 현장의 상황을 잘 반영하는 것으로 판단된다.

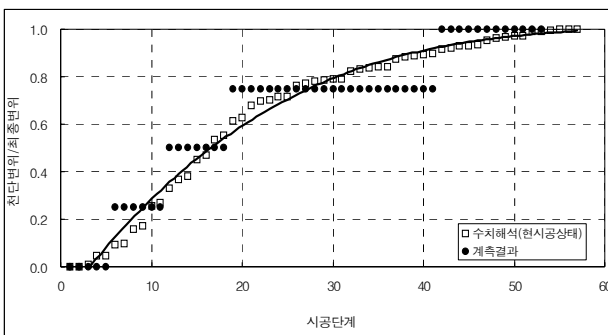


Fig.5 Comparison of Analysis with Monitoring(Displacement)

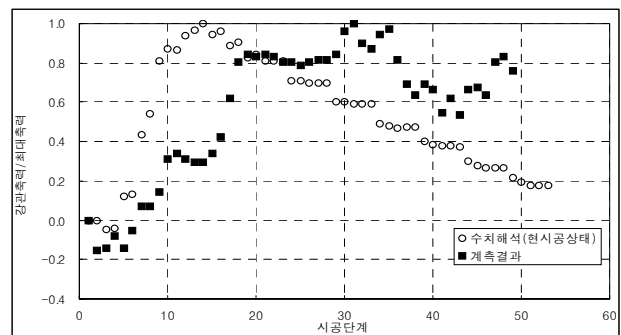


Fig.6 Comparison of Analysis with Monitoring(Axial Force)

4. 매개변수 민감도 분석

매개변수 민감도 분석은 실규모의 시험이 불가능한 현장조건을 감안하여 수치해석 프로그램에 의해서 구조물 및 지반의 거동에 영향을 미치는 여러 가지 인자들의 특성을 파악하여 설계에 적용하기 위한 기초적인 연구이다. 이러한 매개변수 연구는 필연적으로 실제 현장계측값과 해석결과를 비교하여 매개변수 연구 결과를 간접적으로 검증하게 된다.

4.1 매개변수 선정

RPUM 강관의 거동에 영향을 미치는 설계인자들은 터널의 안정성에 기여하는 정도가 각각 달라 몇몇 인자를 달리 설계해도 요소에 의해 동일한 거동특성을 내는 경우가 많다. 그러나, 지금까지 설계자의 입장에서는 고려해야 할 제반 인자들의 보장효과가 정량적으로 나타나 있지 않아 경험적인 설계가 많이 수행되어 왔으며, 그 중 특수한 경우를 제외하고는 강관의 설치범위, 소요열수는 많은 설계에서 동일하게 설계되어 왔다. 따라서, 본 연구에서는 RPUM의 설계인자들에 대한 정량적인 영향을 파악하기 위하여 강관의 길이, 설치간격, 설치각도 및 겹침길이를 매개변수로 선정하였다. 강관 소요량이 감소하는 설계조합을 찾기 위하여 현장설계보다 강관의 길이는 작게, 설치간격은 크게 하였으며, 구조적인 영향을 파악하기 위하여 설치각도 및 겹침길이는 강관의 길이에 맞게 조정하였다. 선정한 매개변수를 산술적으로 조합하여 총 108가지의 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 이러한 매개변수의 조합은 임의의 매개변수를 고정한 후 나머지 매개변수를 조정하여 해석을 수행하고 그 결과를 분석함으로써 각 매개변수들이 터널의 안정성에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있다. Table.3에는 매개변수 조합에 대한 경우를 나타내었다.

Table.3 Parameters of Sensitivity Analysis

길이	설치간격(m)	설치각도(°)	겹침길이(m)
6m	0.4	5	0.125×길이
/			0.250×길이
8m			0.500×길이
/	0.6	10	0.125×길이
10m			0.250×길이
/			0.500×길이
/	0.8	15	0.125×길이
12m			0.250×길이
			0.500×길이

4.2 천단변위 및 강관응력 변화율

본 연구의 매개변수 중에서 강관의 길이는 가장 쉽게 이용할 수 있는 설계변수이므로 강관의 길이에 따른 나머지 매개변수의 변화에 따라 발생하는 천단변위 및 강관응력을 구하여 산술평균값을 고정된 대표값으로 선정하였다. 이러한 방법으로 설치간격, 설치각도 및 겹침길이에 따른 천단변위 및 강관응력을 도시하였고 이를 회귀분석하여 각 매개변수의 중첩하는 영향 정도를 정성적, 정량적으로 파악하였다. Table.4는 해석결과분석에 의하여 각 매개변수들의 변화에 따른 천단변위 및 강관응력 거동상태를 나타낸 표이다.

Table.4 Behaviour Characteristics to Multiple Parameters

고정변수	설계변수	거동특성	
		천단변위	강관응력
강관길이	설치간격	설치간격 증가 ⇒ 천단변위 증가	설치간격 증가 ⇒ 강관응력 증가
	설치각도	설치각도 증가 ⇒ 천단변위 감소	설치각도 증가 ⇒ 강관응력 증가
	겹침길이	겹침길이 증가 ⇒ 천단변위 감소	겹침길이 증가 ⇒ 강관응력 감소
설치간격	강관길이	강관길이 증가 ⇒ 천단변위 감소	강관길이 증가 ⇒ 강관응력 감소
설치각도		강관길이 증가 ⇒ 천단변위 감소	강관길이 증가 ⇒ 강관응력 감소
겹침길이		강관길이 증가 ⇒ 천단변위 감소	강관길이 증가 ⇒ 강관응력 감소

Fig.7~12에는 강관길이에 따른 각 매개변수와 천단변위 및 강관응력과의 관계 및 회귀분석 결과를 도시하였다. 매개변수 조합을 해석한 결과 Table.4와 같이 각 매개변수 변화에 따른 설치간격, 설치각도 및 겹침길이에 따른 천단변위 및 강관응력과의 관계를 알 수 있었다. 각 매개변수 변화에 따른 천단변위 및 강관응력 감소율은 0.021~0.047mm/m, 24.13~59.44tf/m²/m로 파악되었다. 회귀분석 결과를 분석하여 강관길이에 따른 천단변위 및 강관응력 변화율을 타 매개변수의 산술평균으로 고려하여 Fig.13~14에 나타내었다.

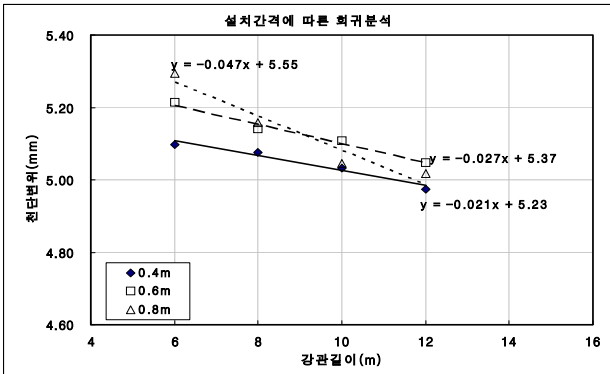


Fig.7 Displacement Regression to Installation Width

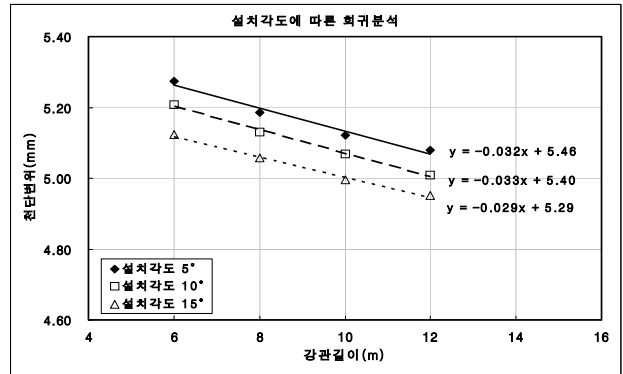


Fig.8 Displacement Regression to Installation Angle

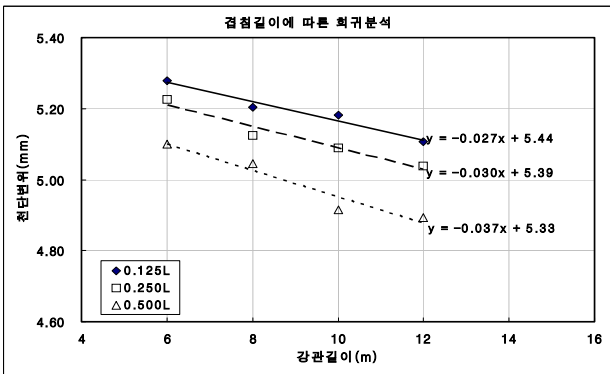


Fig.9 Displacement Regression to Repeated Length

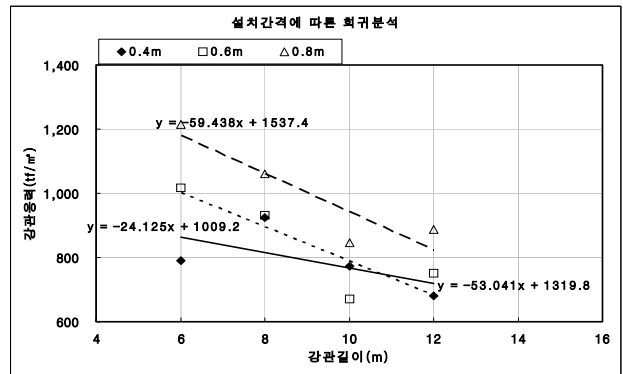


Fig.10 Pipe Stress Regression to Installation Width

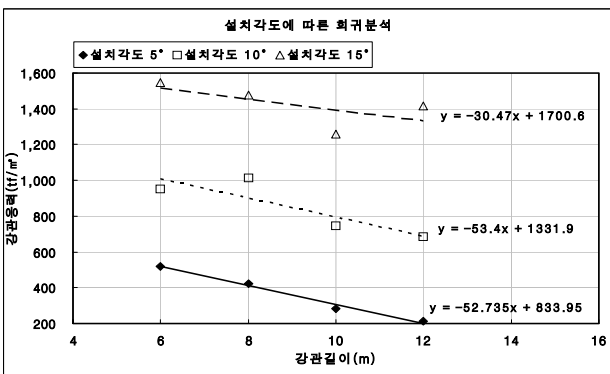


Fig.11 Pipe Stress Regression to Installation Angle

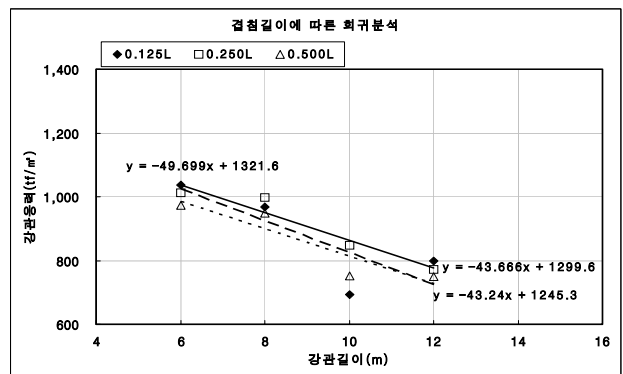


Fig.12 Pipe Stress Regression to Repeated Length

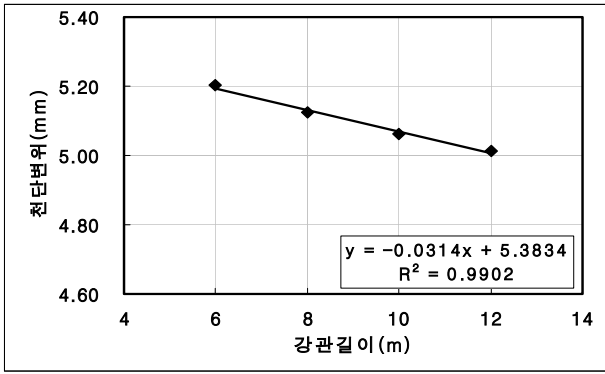


Fig.13 Mean Displacement Variation to Pipe Length

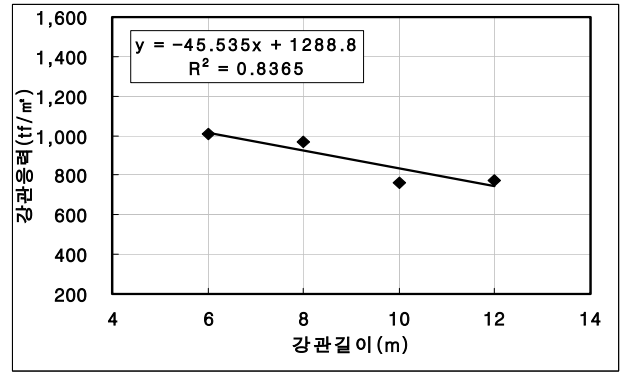


Fig.14 Mean Pipe Stress Variation to Pipe Length

이러한 해석결과를 바탕으로 하여 RPUM 강관의 설계인자에 변화에 따른 천단변위 및 강관응력을 예상할 수 있으며, 현장계측결과와 유사한 거동을 나타내는 설계조합을 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

5. RPUM 강관의 효율적인 설계기법

일반적으로 RPUM 공법에서 지보재로 사용하는 강관은 경험적인 설계방법에 의존하여 설계를 수행하여 왔다. 본 장에서는 기존의 경험적인 RPUM 공법의 기본적인 설계를 파악하고 앞서 수행한 매개변수 조합에 대한 수치해석 결과분석을 바탕으로 현장계측 구간의 효율적인 RPUM 설계방안을 제안하고자 한다.

5.1 RPUM 강관의 설계시 고려사항

RPUM 공법의 설계시에는 일반적으로 다음의 사항을 고려하여야 한다. 첫째, RPUM은 터널굴착시 주변에 미치는 영향을 최소화하기 위해서 터널단면 주변을 따라 일부분 또는 전부분에 대해 강관열을 형성시키는 것이 원칙이나 지반상태 혹은 지표 및 지중의 기존 구조물의 위치를 고려하여 강관배치를 적절히 조정한다. 둘째, 터널 축방향에 대한 RPUM의 적용 구간은 주변의 기존 구조물에 미치는 영향범위, 지형 및 지반상태, 기타 주변환경 여건 등에 따라 결정한다. 셋째, 강관은 그 재질에 따라 다양한 종류가 있으나 일반적으로 구조용 강관이나 FRP(Fiberglass Reinforced Plastic)관이 사용되고 있으며 강관의 단면은 철도, 도로 하부 등과 같이 큰 상재하중이 작용하거나 주변 구조물에 근접하여 터널을 시공할 경우에는 강관의 강성이 커야 하므로 대구경 강관을 사용하고 지중 두께가 어느 정도 형성되어 지반여건이 비교적 양호한 경우에는 중·소구경 강관을 사용한다. 넷째, 강관의 설치간격은 지반여건, 이완하중, 굴착방법, 지보간격 등의 다양한 요소들에 의하여 결정되어야 하나 최근까지도 경험적인 시공사례에 의해 설치간격이 결정되고 있으며 횡방향 설치간격은 40~60 cm, 횡방향 보강범위는 120°~180°를 적용하는 것이 일반적이다. 다섯째, 종방향 설치간격은 기본적으로 기설치된 강관에 의한 막장의 지지범위 이내 이어야 한다. 즉, Fig.15에서 보는 바와 같이 파괴추정선은 항상 지반층의 강관선단 이내에 위치하여야 하며 통상적으로

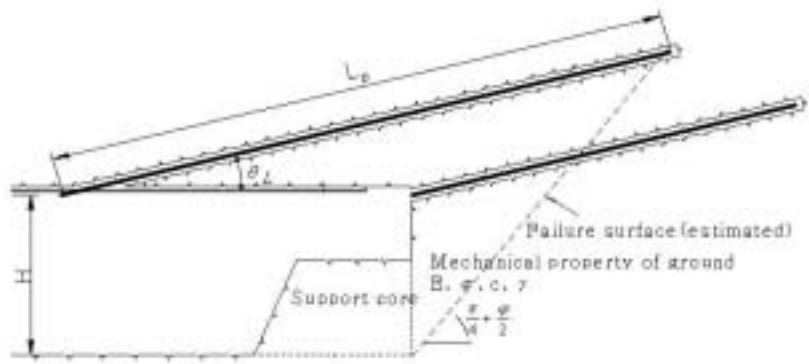


Fig.15 Schematic View of RPUM in the Longitudinal Direction

즉, Fig.15에서 보는 바와 같이 파괴추정선은 항상 지반층의 강관선단 이내에 위치하여야 하며 통상적으로

로 강관길이의 1/4~1/2이 중첩되도록 설계되고 있으나, 터널높이와 지반조건이 고려되지 않고 경험적으로 적용되고 있다. 여기서, L_p 은 강관의 길이, H는 터널높이, θ_L 는 종방향 타설각, ϕ 는 지반의 내부마찰각이다. 여섯째, 강관의 설치각도는 그라우팅 효율과 밀접한 관계가 있어서 각도를 증가시키면 강관선단부의 이격높이가 증가되어 터널 굴착시 주입되지 않은 터널 천단 상부지반이 붕락될 수 있기 때문에 일반적으로 5~15°를 적용한다.

5.2 계측현장 시공단면에 대한 검토

본 연구에서 적용한 현장계측 구간은 터널 보조공법으로 RPUM 공법을 적용하고 있으며 공법의 설계 현황은 다음 Table.5와 같다. 여기서, 보강범위 및 강관의 규격은 매개변수에서 제외하였으므로 강관의 길이, 설치간격, 설치각도 및 겹침길이에 대하여 해석결과를 바탕으로 재고찰하였다.

Table.5 A Summary of RPUM Design in Monitoring Section

보강범위	강관규격	강관길이	설치간격	설치각도	겹침길이
150°	ϕ 114mm, t=9mm	12.0m	0.4m	10°	8m

강관의 길이는 RPUM 설계에 있어서 가장 중요한 인자이다. 강관의 길이가 길수록 그라우팅 영역이 넓어져서 강관의 보(Beam) 작용성이 커져 터널 천단의 안정성을 증가시킨다. 이러한 보(Beam)작용이 발휘되기 위해서는 Fig.15와 같은 터널 굴착경과 막장거리에 따른 주동토압 파괴 포락선에 벗어나도록 강관의 길이를 결정하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

Fig.7~14에 나타난 회귀분석 결과 값을 이용하여 현장계측 값에 따른 수치해석값을 보정하였다. 즉, 설계인자의 변화에 따른 천단변위 및 강관응력의 변화율을 파악한 결과를 이용하여, 천단변위 및 강관응력을 산정할 때는 현장에서 측정된 계측값에 각 설계인자 변화에 따른 천단변위 및 강관응력 변화율을 곱하여 매개변수 조합에 따른 설계조합의 예상 천단변위 및 강관응력을 산정하였다. 이러한 방법을 이용하여 매개변수 조합에서 검토하지 못한 강관의 길이에 대하여 천단변위 및 강관응력을 예상할 수 있다. 이 때 천단변위 및 강관응력 예상값이 현장계측값의 5% 이내의 차이값을 나타내는 매개변수 조합 중에서 강관의 길이가 최소인 경우를 Fig.16~17에 나타내었다. 즉, 강관의 길이를 11m일 때 천단변위 및 강관응력은 모두 한계값 이내로 예상되어 강관의 길이가 11m인 설계조합은 모두 현장 설계조합과 유사한 거동을 나타내는 것으로 간주할 수 있을 것으로 판단된다. 그림에서 현장계측, 한계변위 및 한계응력 값은 수평방향 축의 레이블과는 관계없는 현장 시공단면의 계측값이며, 그에 대한 5% 한계값을 나타낸 것이다. 여기서, 5% 한계값은 일반적으로 적용할 수 있는 오차에 대한 공학적인 판단에 근거한 값이나, 설계자가 가감할 수 있다.

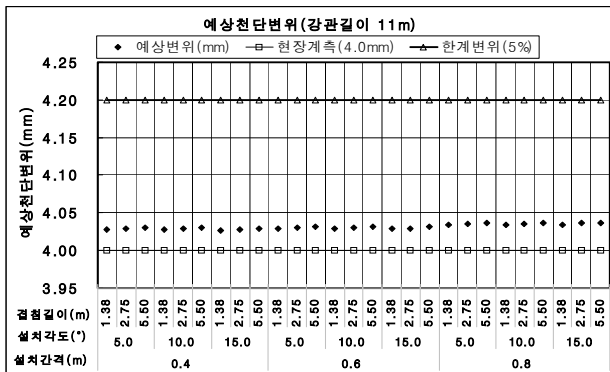


Fig.16 Expected Displacements(Pipe Length 11m)

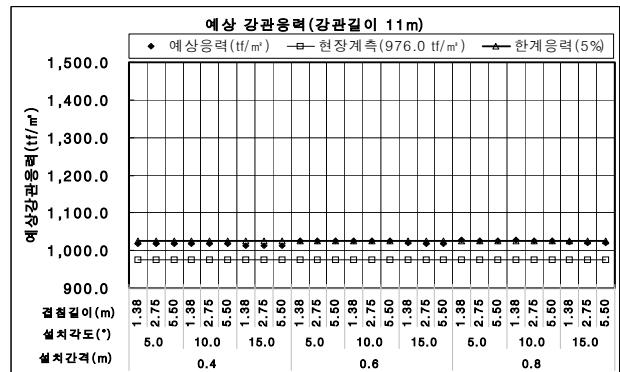


Fig.17 Expected Pipe Stresses(Pipe Length 11m)

이러한 유사거동을 나타내는 설계조합의 경제성을 파악하기 위하여 RPUM 공법에서 많은 비용을 차지하는 강관의 소요량을 산정하였다. Fig.18에서 설계 강관량은 현장 시공단면에서 소요되는 단위면적당 강관소요길이를 나타낸 것이다. 강관의 길이가 11m 일 때, 설계 강관량의 80% 이하가 산정되는 매개변수 조합은 설치간격이 0.6m이상, 겹침길이가 1.53(0.250L)~4.0m일 경우인 것으로 나타났다. 이러한 매개변수 조합은 현장 시공단면보다 강관 소요량이 현장 시공단면의 39.6~78.3%이며, 천단변위 및 강관응력의 거동이 유사하여 경제적으로 효율적인 단면이라고 판단된다.

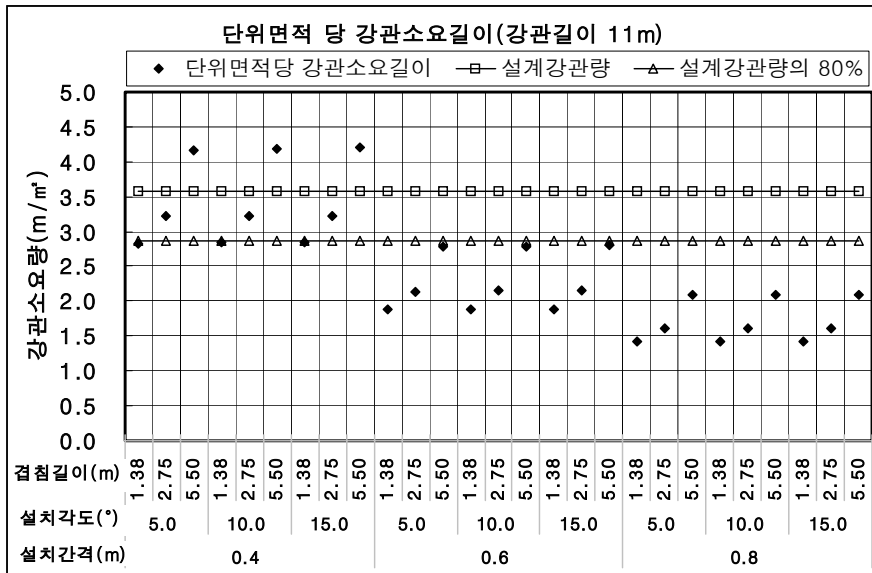


Fig.18 Expected Amount of Steel Pipe(Pipe Length 11m)

5.3 RPUM 강관의 효율적인 설계 기법

5.2에서는 현장계측이 수행된 기 시공단면에 대하여 매개변수 해석 결과를 바탕으로 RPUM 강관 설계 내용을 개선하였다. 전술한 방법은 계측결과를 이용한 RPUM 공법의 개선방안이므로 실제 설계단계에서 적용하기는 곤란하여, 다음과 같이 실제 설계 단계에서 적용할 수 있는 RPUM 강관의 효율적인 설계기법을 제안하고자 한다.

(1) 설계구간은 수치해석시 적용한 지반조건과 유사한 충적층 기반의 토사터널로 강관을 이용한 터널 보조공법이 수행되며, 링컷 상하분할 굴착이 수행되는 현장이어야 한다. 이 때, 중요구조물 통과구간이나, 막장면에 지하수 용출이 예상되는 구간은 매개변수 해석시의 기본가정사항과 맞지 않으므로 추가 해석 및 결과분석을 통하여 적용하도록 한다.

(2) 기존의 RPUM 설계방법으로 강관의 설치범위, 제원, 열, 길이, 설치간격, 설치각도 및 겹침길이를 산정한다.

(3) 강관의 설치범위, 제원 및 열은 매개변수 인자로 고려하지 않았으므로 변경하지 않는다. 이 때 강관의 길이는 반드시 Fig.15의 주동토압 파괴 포락선 외부에 있도록 설계한다.

(4) 예상천단변위를 산정함에 있어 기준이 되는 허용 천단변위는 풍화암 지반 터널의 일반적인 천단변위 1차 관리기준값인 10~15mm의 80%, 즉 8~12mm를 적용하여 산정하도록 한다. 이는 일반적으로 터널의 안정성을 유지하는 천단변위의 한계값에 대하여 20%의 안전마진(Safety Margin)을 적용함으로써 터널 천단변위 예측의 안전성을 확보하기 위함이다. 20%의 안전마진은 공학적인 판단에 의한 값으로 현장의 상황에 따라 가감할 수 있다. 예상 강관응력 산정에 있어서도 마찬가지이다.

(5) 매개변수 조합 단면의 천단변위 및 강관응력을 예측하여 천단변위 1차 관리기준값과 비교하여 천단변위 및 강관응력이 1차 관리기준값의 5% 이내로 동시에 만족하는 매개변수 조합을 산정한다.

(6) 기존의 방법으로 설계한 단면의 강관소요량과 (5)의 과정을 만족하는 단면의 강관소요량을 비교하여, 기존 설계 단면에 비하여 강관소요량이 80% 이하로 감소하는 설계 단면을 선정하여 이를 개선된 RPUM 설계단면으로 선정한다. 여기서, 강관소요량의 20% 감소는 공학적 판단에 의한 값으로 현장여건 및 설계자 의도에 따라 가감할 수 있다.

(7) 이러한 과정에 의해서 강관의 소요량을 절감할 수 있을 것으로 판단되며, 보다 경제적인 설계를 위해서는 강관의 제원 및 RPUM 시공에 따른 부대공의 소요량에 대해서도 비교·검토하여야 한다.

본 연구결과를 실무에 보다 폭 넓게 적용하기 위해서는 다음과 같은 사항을 고려해야 한다. 첫째, 현장 지반조건, 지장물 조건, 터널 굴착과정 및 지하수 조건이 상이할 경우 현장 조건을 고려하여 매개변수 해석을 수행하고 그 결과를 분석하여 RPUM 강관을 설계하여야 한다. 둘째, 강관의 최소 길이는 막장면의 주동토압을 지지할 수 있도록 강관이 주동토압 파괴면보다 바깥에 위치하도록 산정한다. 셋째, 매개변수 민감도 분석에서는 매개변수를 3~4단계로 변화하도록 설정하였으나, 현장에 적용할 수 있는 정확한 결과를 얻기 위해서는 5개 이상의 변화단계를 설정하고 이에 대한 매개변수 조합을 해석하는 것이 바람직하다. 넷째, NATM 공법에 의한 터널 시공은 항상 시공 후 현장계측이 뒷받침되어야 하므로 제안한 설계방안으로 경제적인 설계를 위해서는 설계한 단면에 대한 계측을 철저히 수행하고 분석하여 계측결과를 설계에 피드백(Feedback)하는 과정이 반드시 필요하다.

6. 감사의 글

본 연구에서 사용한 현장계측데이터를 제공한 지하철 9호선 쌍용건설 현장 관계자와 계측을 담당하신 새길이엔씨의 이완성 과장님, 논문에 대한 조언을 아끼지 않으신 건화엔지니어링 황효석 감리단장님을 비롯한 관계자 여러분께 감사드립니다.

7. 참고문헌

- [1] 이준석, 방춘석, 최일윤, 엄주환, "터널용 강관다단공법의 설계기법에 관한 연구", 대한토목학회논문집, Vol.20, No.3, pp.305~414, 2000
- [2] 차민웅, "Umbrella Arch 공법 적용시 강관의 거동에 관한 수치해석적 연구", 한양대학교 대학원, p.14, 2004
- [3] Barisone, G., Pigorini, B., Pelizza, S., "Umbrella Arch Method for Tunnelling in Difficult Conditions-Analysis of Italian Cases", Proc. 4th Cong. Inter. Assoc. of Engineering Geology, New Delphi, Vol.4, pp.15~27, 1982
- [4] Pelizza, S. and Pelia, D., "Soil and Rock Reinforcements in Tunnelling", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.8, No.3, pp.357~372, 1993
- [5] 최용기, 김창용 외 2인, "연약지반 터널 굴착시의 지반보강 사례연구", 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, pp.133~139, 1997
- [6] 배규진, 김창용 외 2인, "Umbrella Arch 공법에 의한 터널 천단부 보강시 주변 지반의 거동에 관한 연구", 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, 제7권, 제4호, pp.299~309, 1997
- [7] Durand, J. P., Perffayet, M., Jassionnesse, C & Reith, J. H., "Surface Settlements in Urban Tunnelling Works : Design Approach for Toulon Underground Motorway Crossing", Tunnelling and Ground Condition, Adbel Salam(ed), Balkema, 1994
- [8] (주)마이다스 아이티, "Midas/GTS Manual", 2004