

Umbrella Arch 공법이 적용된 터널의 3차원 유한요소 해석에 관한 연구

김창용¹⁾ · 배규진²⁾ · 문현구³⁾ · 최용기⁴⁾

A Study on the Three Dimensional Finite Element Analysis for the Tunnel Reinforced by Umbrella Arch Method

Chang-Yong Kim, Gyu-Jin Bae, Hyun-Koo Moon and Yong-Ki Choi

ABSTRACT Recently, Umbrella Arch Method(UAM), one of the auxiliary techniques for tunnelling, is used to reinforce the ground and improve stability of tunnel face. Because UAM combines the advantages of a modern forepoling system with the grouting injection method, this technique has been applied in subway, road and utility tunnel sites for the last few years in Korea. Also, several research results are reported on the examination of the roles of inserted pipes and grouted materials in UAM. But, because of its empirical design and construction methodology, more qualitative and systematic design sequences are needed. Therefore, above sequences using numerical analysis are proposed and, the effects of some design parameters were studied in this research. In order to accomplish these objects, first, the roles of pipe and grouting materials, steel-rib and the others in ground improving mechanism of UAM are clarified. Second, the effects of design parameters are investigated through parametric studies. Design parameters are as follows; 1) ground condition, 2) overburden, 3) geometrical formulation of pipes, 4) grouting region and 5) characteristics of pipes.

Key words : umbrella arch method, 3-D FEM analysis, tunnel crown settlement, surface settlement, tunnel face horizontal displacement.

초 록 최근 터널 굴착 보조공법중의 하나인 강관 보강형 다단 그라우팅 공법(Umbrella Arch Method, UAM)은 지반을 보강하고 터널 막장의 안정성을 증진시키기 위해서 많은 현장에서 사용되고 있다. 이러한 UAM은 터널 보강목적의 forepoling과 차수목적의 grouting이 한 공정으로 구성되어 있다는 잇점 때문에, 최근 국내 지하철, 도로터널 및 전력구 터널 등에서 많은 적용 사례를 찾아 볼 수 있다. 그러나 이 공법은 주로 현장 시공을 통해서 얻어진 경험적인 방법에 의해서 설계와 시공이 이루어지고 있기 때문에 본 공법에 대한 보다 정량적이고 체계적인 설계인자 평가 작업이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 수치해석 방법에 의한 체계적이고 정량적인 효과확인 과정을 제안하였고, 몇몇 설계인자에 대한 매개변수 변환연구를 수행하였다. 이를 위해서 먼저, UAM의 지반보강기구에 있어서 관련된 강관, 그라우트재 및 강지보재 등의 역할을 밝히고자 하였고, 두번째로 매개변수 변환연구를 통해 UAM의 설계 제요소들에 대한 영향을 평가하기 위해 1) 지반조건별, 2) 토피고별, 3) 강관배치형상별, 4) 그라우트 영역별, 5) 강관자체 특성별 해석을 수행하여 각 항목별로 상호 비교·분석하였다.

핵심어 : Umbrella arch method, 터널 보조공법, 3차원 유한요소 해석, 터널 천단침하, 지표침하, 터널 막장수평변위.

1. 서 론

일반적으로 지반조건이 열악한 토사 및 암반 터널을 시공할 때에는 터널의 안정성 증대와 인접구조물의 손상방지를 위하여 지하굴착 보조공법을 적용하게 된다. 이러한 보조공법들은 시공 중인 터널 주변 지반의 응력 및 변형 상태를 변화시키고 안정화를 이루기 위해서 사

용되는데, 각 공법들은 지반조건이나 지질특성, 지하수 상태에 따라 서로 다른 목적으로 사용될 수 있고, 경제성 및 시공성을 고려하여 2개 이상의 공법을 혼용하여

- 1) 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구팀장
- 2) 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원
- 3) 정회원, 한양대학교 공과대학 지구환경건설공학부 부교수
- 4) 정회원, 대원토질(주) 사장

사용하기도 한다.^{2,3,7)} 최근 국내에서도 각종 지하철 및 도로터널, 전력구 공사를 수행하면서 많은 시공 사례를 찾아 볼 수 있는 공법이 강관 보강형 다단 그라우팅 공법(Umbrella Arch Method, 이하 UAM)이다. 그러나 이 공법은 현장에서의 경험적인 Know-How와 시공 사례가 설계와 시공방법을 결정하는 주요 요인으로 작용하기 때문에 공법에 대한 정량적인 분석이나 설계, 시공 체계정립이 이루어지지 못하고 있는 실정이다.^{2,7,8)}

국내·외적으로 UAM에 대한 많은 연구가 수행되고 있으며, 이에 대한 연구는 다음과 같은 세 분야로 나눌 수 있다.

첫째는 시공사례분석연구 분야로서 Barisone과 Pelizza(1982), Pelizza와 Peila(1993), 山本念과 Pagliacci(1992), 최용기와 김창용 등(1997)의 연구 결과를 들 수 있다. 이들의 연구에서는 주로 열악한 현장 상황에 따라 여러 보조공법을 적용해 보고, 이 중 시공성 및 경제성 측면에서 매우 유리한 본 공법을 적용해 보았을 때의 터널 막장 안정 효과와 지반 개량 효과 등을 분석하였으며, 본 공법에 대한 사례 분석, 시공법, 보강기구 등을 연구하였다. 연구 결과에 의하면 연약한 지반이나 진물이 밀집된 도심지에서는 본 공법이 터널 막장의 자립도를 향상시키고, 지반침하를 억제하며, 지하수 유입을 차단하는 등 시공성 및 경제성 측면에서 매우 우수한 것으로 보고되고 있다.^{8,16,21,29)}

둘째는 각종 현장계측에 의한 공법의 보강효과관련 연구 분야로서 Bruce와 Gallavresi(1988), 水本明喜와 天夜光也(1991), Pelizza와 Grasso(1994), 지오틱엔지니어링(1994), 배규진과 김창용(1997) 등의 연구 결과를 들 수 있다. 이들은 대부분 특정 현장에서 본 공법을 적용하였을 때의 터널 및 주변지반의 거동 특성을 분석하고, 강관 및 그라우트재의 보강효과를 계측 결과로부터 확인하는 연구를 수행하였다. 이들 중 배규진과 김창용(1997)은 본 공법을 적용할 경우, 풍화암 구간에서 타 보조공법(chemical grouting, forepoling 등) 적용시 보다 지표침하량은 약 1/2 정도, 천단 침하량은 1/3 정도의 경감 효과를 얻을 수 있고, 막장의 안정성을 판단할 수 있는 안정비(stability ratio)도 2배 이상 증진되는 등의 좀 더 구체적인 연구 결과를 보고하고 있다.^{2,7,22,31)}

셋째는 수치해석에 의한 공법의 효과를 확인하려는 연구분야로서 Swoboda와 Wagner(1990), 小泉光政과 畠田和哉(1990), Pelizza와 Peila(1994), Kotake와 Yamamoto(1994), Durand와 Deffayet(1994), 배규진

과 김창용 등(1994), 유충식과 김연정 등(1995), 이봉렬과 김학문 등(1996)의 연구를 들 수 있다. 이들의 연구는 본 공법의 효과 확인 연구와 설계를 위한 매개변수 변환 연구가 주류를 이루고 있다. 본 공법의 특성상 현장에서 여러 설계 매개변수를 변화시키면서 실험을 수행할 수 없기 때문에 이를 수치 모델화하여 지반거동 경감 효과 및 그라우팅 효과, 지반 조건 및 각종 설계 매개변수 변화에 의한 다양한 해석 결과들을 제시하였다. 특히, 전산기기의 발달과 더불어 가정 사항이 많은 2차원 해석을 탈피하여, 3차원 거동 분석을 실험함으로써 설계자로 하여금 해석 결과를 설계에 반영할 수 있도록 하는 연구 결과를 제시하고 있다.^{1,4,5,6,17,23,27,30)}

이러한 사례 분석 연구, 현장계측 연구, 수치해석 연구 등의 다양한 연구 결과에도 불구하고, 이러한 연구 결과가 본 공법의 설계, 시공에 직접 활용되기 보다는 단지 사례연구에 그치고 있고, 체계적인 설계가이드나 보강패턴 결정에는 기존의 설계 및 시공 사례를 그대로 답습하고 있는 실정이다. 또한 경제적인 시공을 위해서 필요한 적정 보강 물량이나 보강 구간 선정에 있어서도 어떠한 근거나 이론을 바탕으로 산출되는 것이 아니라, 단순히 유사한 현장 시공 경험이나 설계 경험에 전적으로 의존하고 있는 실정이기 때문에 본 공법의 효과를 극대화시키지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 인식하고, 현재까지 연구가 미비한 분야 즉, 설계자 입장에서 본 공법을 설계를 할 때 고려해야 할 제반 설계 인자들에 대해서 많은 매개변수 변환 연구를 수행하였고, 각 인자들의 특성 파악과 아울러 그 보강효과를 검토하여 설계에 반영할 수 있도록 하였다.¹²⁾ 터널 시공 중 본 공법을 적용할 경우의 지반거동 및 터널 지보재(강관, 그라우트재, 강지보공 등)의 역할을 규명하고, 본 공법 설계에 중요한 영향을 미치는 인자들에 대한 매개변수 변환연구를 수행하였다. 여기서 해석에 필요한 입력치는 실측치를 사용하였고, 설계 인자 매개변수 변환연구에서는 실제 현장에서 관찰된 강관 주변의 구근의 형태 및 크기를 고려해서 강관과 주변 그라우트재가 복합체(composite structure)로서 거동을 하는 것으로 가정하였다.

먼저, 특정 터널단면에 대한 사례연구 위주로 전산해석을 수행하여 경험적인 설계로 이루어지고 있는 UAM의 효용성을 입증하기 위해서 1) 지반에 강관만 타설된 경우, 2) 그라우팅만 수행하는 경우, 3) 강관 및 그라우팅을 동시에 고려한 경우, 4) 강지보공을 설치한 경우에 대

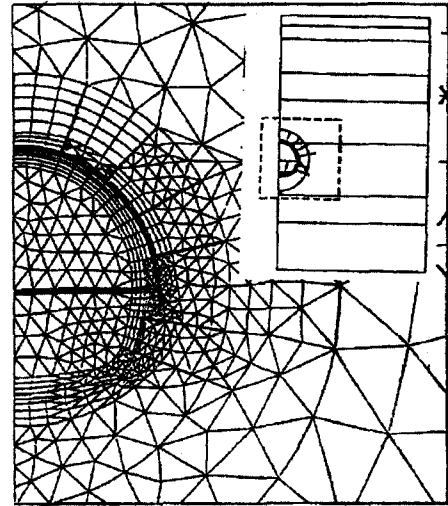
해 해석하였다. 그리고 UAM의 설계 인자들에 대한 영향을 평가하기 위해서 지반조건, 터널 토파고 등 총 9개의 경우에 대해서 각 항목별로 개별적인 해석을 수행하여 그 결과를 상호 비교·분석하였다.

2. UAM의 수치모델링 기법

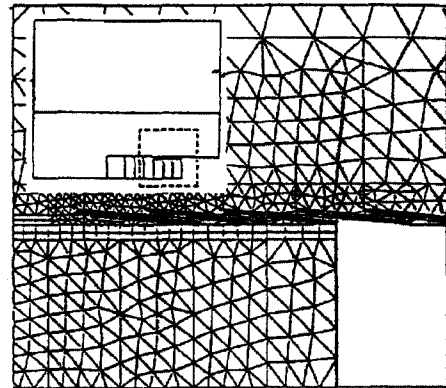
2.1 Solid element에 의한 강관 및 grouting 영역의 모델링 기법.

본 연구에 사용된 SMAP-3D 프로그램은 토사, 암석, 콘크리트 등의 비선형적인 거동을 모델링할 수 있는 유한요소해석(Finite Element Method) 프로그램으로써 가상일(virtual work)의 원리를 이용해서, 연속체 요소(continuum element), 보 요소(beam element), 트러스 요소(truss element) 등에 대한 구조적 평형 방정식을 유도할 수 있는 알고리즘으로 이루어져 있다. 탄소성 재료특성을 모델화하기 위해서 본 프로그램은 Kim, Piepenburg와 Merkle(1986)²⁶⁾에 의해 개발된 탄소성 재료모델을 사용하고 있다. 이 재료모델은 associated flow rule을 따르는 소성이론을 기반으로 하고 있고, Von Mises, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Generalized Hoek and Brown 모델을 고려할 수 있다.²⁶⁾

강관과 주변지반이 그라우트재로 채워진 상태의 영역을 등가 HSSE(High Stiffness Solid Element)로 모델링하는 방법이 최근 들어 몇몇 연구결과로 보고된 바가 있다.^{1,4,5,6,17,23,27,30)} 특히, 2차원 터널 중·횡단면 해석의 경우는 주로 이 방법을 사용하고 있다. Fig. 1(a), (b)는 France Toulon motorway 터널 시공시 본 공법의 효과를 확인하기 위해서 CE SAR-LCPC라는 2차원 유한 요소해석프로그램으로 모델링한 경우이다.²³⁾ 횡단면상의 아치(arch)는 보(beam) 요소를 사용하였고, 종단면상의 강관 및 그라우팅 영역은 HSSE를 사용하였다. 또한, 국내의 경우도 UAM에 대한 효과검증을 위하여 HSSE를 사용해서 2차원 해석을 한 경우가 많으며, 3차원 해석에서도 이 방법을 사용한 예가 있다.^{1,5,6,7,12)} 그러나 이 방법은 그라우팅영역의 물성치와 영역 범위에 따라 해석결과가 큰 차이가 나고, 굴착 및 시공순서에 따라서 그라우팅 영역을 순차적으로 어떻게 모델링을 하느냐는 것이 큰 문제점이 될 수 있다. 하지만, 현장에서 그라우팅된 지반 물성치 및 영역을 현실적으로 측정할 수 있다면 해석의 간편성이나 해석시간의 단축 측면에서는 유리한 방법이 될 수 있다. 그러나 이러한 방



(a) A transverse section



(b) A longitudinal section

Fig. 1. An example for 2-D modelling using HSSE

법의 가장 큰 문제점은 본 공법 자체의 설계 인자에 대한 영향이나 강관의 개별적인 거동해석이 불가능하다는 점이다.

2.2 보요소에 의한 강관 및 그라우팅의 모델링 기법

이 기법은 강관과 그라우팅 영역 전체를 등가 HSSE를 이용하여 해석하는 방법의 단점을 보완하기 위해서 Fig. 2에서와 같이 강관과 그라우팅 영역을 강관과 그라우팅 물성치들이 상호 고려된 보 요소로 묘사하는 기법이다. Fig. 3은 그라우팅 효과를 파악하기 위해 풍화암 지반에서의 현장 실험을 실시한 결과(배규진, 김창용 등(1995))를 보여주고 있다. 실제 현장에서 그라우팅 작업을 한 후 강관 주변지반에 그라우트재가 채워진 형상을

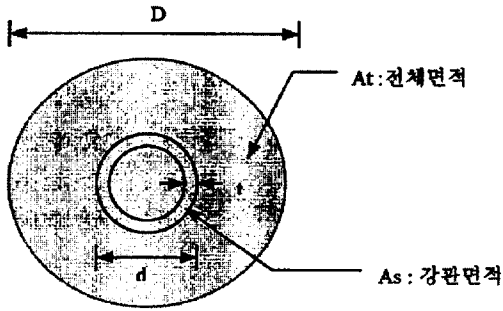


Fig. 2. A view of equivalent grouting zone including pipe

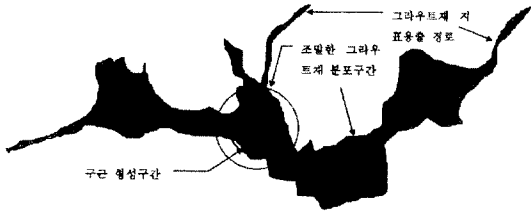


Fig. 3. A view of face mapping around UAM reinforced tunnel crown

보여주는 그림으로서 강관 주변에 일정 영역까지 구근이 형성되고, 그 나머지 부분은 그라우트재가 조밀하게 분포하거나 지반 내 공극이나 절리를 따라서 채워지게 된다. 그라우트재가 강관과 강관 사이에서는 비교적 얇게 연결이 되어 있어서 차수재 역할을 담당하고, 강관 주변의 구근형성 부분은 강한 보강재 역할을 하게 된다. 따라서 본 연구에서는 상기의 현장 관찰 결과를 토대로 구근이 형성된 부분이 하나의 복합체(composite material)로서 거동한다는 가정 하에 (1)식과 같이 구근 형성 부분의 유효면적과 각 재료의 탄성계수를 이용하여 등가 탄성계수를 구하였다. 이를 강관의 물성치로 입력하여 강관과 구근 형성 부분의 그라우트재를 동시에 고려할 수 있도록 하였다. 이러한 방법을 적용할 경우 강관 자체의 설계 인자의 영향이나 강관의 독립적인 하중경감효과를 파악할 수 있다.^{11,12)}

$$A_t = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 : \text{전체면적}$$

$$A_s = \pi \left(\left(\frac{d}{2} \right)^2 - \left(d - \frac{2t}{2} \right)^2 \right) : \text{강관면적}$$

$$E = \frac{(A_t - A_s) \times E_g + A_s \times E_s}{A_t} \quad (1)$$

여기서, E : 등가 탄성계수, E_g : 그라우트재 탄성계수, E_s : 강관의 탄성계수

3. UAM에 대한 3차원 유한요소 해석 모델

3.1 해석개요

본 수치해석 연구에서는 UAM의 보강기구(reinforcing mechanism)를 규명하기 위해서 이미 시공이 완료된 서울지하철 5-A 공구 터널의 한 단면을 해석단면으로 선정하였다. 터널은 폭과 높이가 각각 8.6 m, 7.8 m 인 단선병렬 터널이고, 터널의 토피고는 약 27 m 이다.^{2,12)}

Fig. 4는 2차원 횡단면상의 전체 요소망으로 터널의 단면형상, 지층, 굴착시공 순서, 강관위치 등을 고려하여 모델링하였고, 요소는 일반적으로 굴착에 따른 응력 변화가 크게 발생하는 터널 굴착면 주위에 조밀하게 배치하였다. 그림에서와 같이 경계조건의 영향을 최소화하기 위해서 유한 요소망의 측면 및 하단 경계면을 터널 직경의 5배 이상이 되도록 하였다.

Fig. 5는 횡단면도상의 강관의 위치를 나타내는 그림으로 강관은 외경 75 mm, 두께 7 mm, 길이 15 m로 터널 천단을 중심으로 좌우 각각 10개가 일정한 간격으로 배열되어 있고, 터널 갱구부에서 15 m 되는 지점에서부터 이격거리가 5 m 간격으로 3열을 설치하는 것으로 하였다. 강관 삽입각도는 3차원 전산해석의 해석시간, 용량을 고려하여 터널 굴진방향과 평행하게 수평천공하는 것으로 가정하였다.

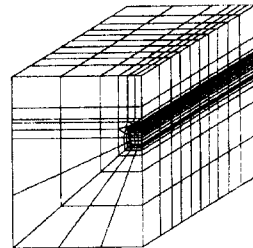
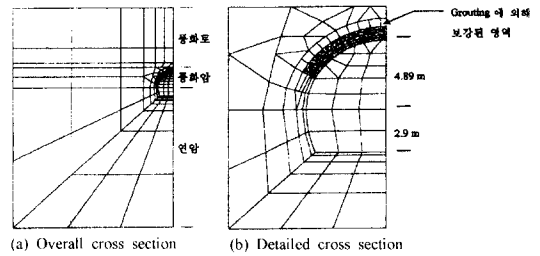


Fig. 4. 3-D FEM model for verifying effectiveness of UAM

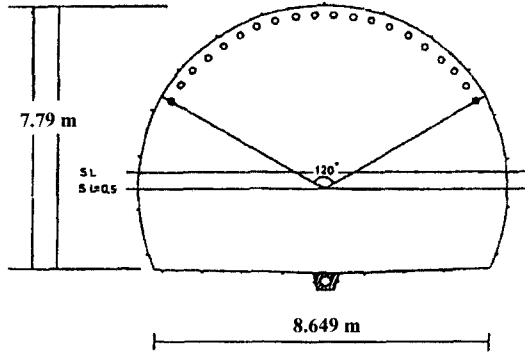


Fig. 5. The location of applied UAM in transverse section

특히, 그라우팅 효과를 확인하기 위해서 HSSE 방법에 의해서 실제 계측된 주압범위 및 물성변화 정도를 고려하여 해석을 수행하였다. 특히, 경험적인 설계로 이루어지고 있는 UAM의 효용성을 입증하기 위해서 1) 다열식 강관만 타설된 지반의 터널굴착으로 인한 거동을 분석하였고, 2) 강관이 타설되지 않은 상태에서 그라우팅에 의한 지반 보강효과를 파악하였고, 3) 강관과 그라우팅을 동시에 고려할 경우의 지반거동을 분석하였으며, 4) 현장의 실제 시공조건으로서 강관 선단부에 강지보공(steel-rib)을 설치하였을 때의 강관과 지반의 거동을 분석해 보았다.

3.2 해석조건

본 연구에서는 UAM 시공에 의한 지반거동 특성을 파악하기 위하여 앞서 3.1 절에서 제시한 것과 같이 크게 4종류의 해석 모델을 설정하였다. 이는 지반 내에서 강관의 거동특성이 현재 명확히 규명되어 있지 않고, 그라우트재의 역할 및 강관 선단부의 강지보재 설치 등 여러 가지 인자들의 상호 작용에 대한 충분한 검토가 없이는 본 공법의 효용성 검증이 어렵기 때문이다. 따라서 이러한 점들을 고려할 수 있는 방안으로서 굴착 중 강관만 타설한 경우(case 1), 강관과 강지보재를 동시에 고려한 경우(case 2), 그라우팅만을 고려한 경우(case 3), 강관과 그라우팅을 모두 고려한 경우(case 4) 등에 대해서 3차원 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 6은 이러한 효용성 검증을 위한 모델 개념도를 나타낸다.¹²⁾

또한, 해석에 사용된 지반 물성치는 Table 1처럼 본 공법 시공구간인 서울지하철 5-A 공구 실측치 및 설계치를 사용하였다.

Table 2는 등가 구근 및 강지보재 물성치를 나타내

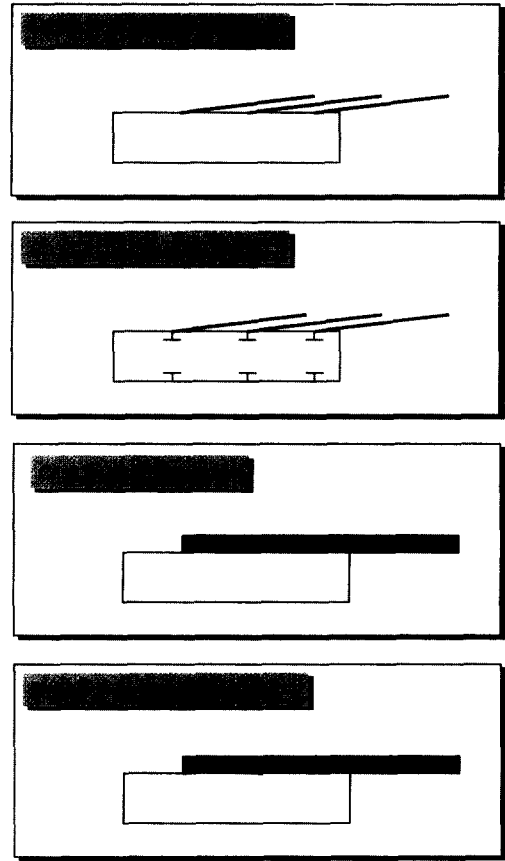


Fig. 6. Models for verifying the effectiveness of UAM

Table 1. Material properties for ground and shotcrete^{2,12)}

	E (t/m ²)	v	φ (°)	C (t/m ²)	γ (t/m ³)
Weathered soil	8,000	0.35	35	0	2.0
Weathered rock	51,000	0.33	40	30	2.2
Weathered rock (grouted)*	200,000	0.33	-	-	2.2
Soft rock	211,000	0.3	45	50	2.45
Shotcrete	1,000,000	0.2			2.5

* is field measured results.

는 것으로 앞서 2장에서 고려한 방법을 이용해서 구한 강관과 그라우트재에 의한 등가 구근의 물성치(4절에서 이용)와 강지보재의 물성치(3절에서 이용)를 보여주고 있다.

경계조건은 상부지표면은 자유경계조건, 측면 및 하부 경계는 각각 면에 수직 방향의 변위를 고정하는 변위 경계조건을 사용하였으며, 굴착단계 및 시공순서는 현장 시공 조건을 고려, 총 13단계의 시공단계로 굴착→

Table 2. Material properties for equivalent grout zone and steel rib^{2,12)}

	E (t/m ²)	G (t/m ²)	Area (m ²)	I (m ⁴)	Remark
Equivalent properties of pipe and grouted material	2,450,000	1,021,000	0.018	0.000025	For chap. 4
Steel rib	21,000,000	8,750,000	0.0062	0.000016	For chap. 3

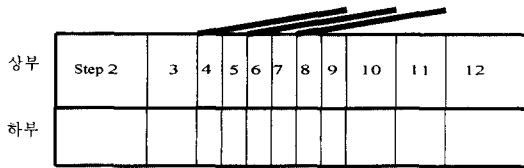


Fig. 7. Excavation and support steps in 3-D model

shotcrete 타설 → 강관타설 및 그리우팅 → 굴착 순으로 각 단면별로 시공단계를 설정하였다. Fig. 7에서 step은 굴착단계를 나타내고 있다.

3.3 해석결과

본 연구에서는 앞서 제시한 총 4가지 모델에 대해서 터널 천단침하, 막장 주변의 수평변위, 종·횡방향의 지표침하 등을 비교·분석하였다. Fig. 8(a),(b)는 각각 터널 주변 및 지표, 막장면에서의 변위 비교 지점을 나

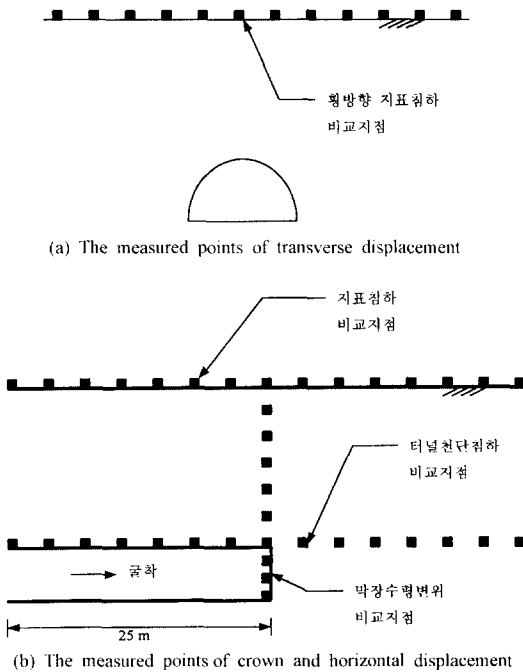


Fig. 8. The comparison points for ground settlement

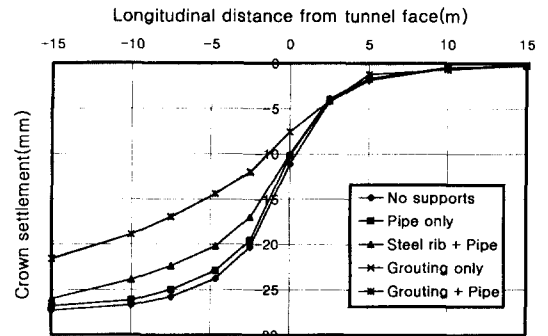


Fig. 9. Crown settlements of longitudinal crown nodal points

타내고 있다.

3.3.1 천단침하

도심지 터널 보강시 가장 크게 영향을 받는 것이 터널 천단침하이다. 특히, 강관 및 그리우트재가 터널 천단부를 따라 종방향으로 타설·주입되기 때문에 보강 전·후의 천단침하를 비교·분석하는 것이 매우 중요하고, 본 공법의 지반보강 효과를 직접적으로 평가할 수 있다. 먼저, 터널 천단침하 분포를 알아보기 위해 기 굴착부분 및 굴착예정 천단 중앙부 절점들의 수직변위를 비교하였다.

Fig. 9는 터널 갱구부로부터 25 m 지점까지 상·하 반 분할 굴착 후 천단침하를 그림으로 나타낸 것이다. 본 공법에 의한 보강 영역을 도시해 볼 때, 터널 굴착 높이(H=7.8 m)로 정규화하면 막장 전방 1 H 지점에서부터 막장 후방 2 H 지점까지 보강 영향권으로 나타나고 있다.

강관만을 고려한 경우(case 1)는 보강을 하지 않은 경우와 변위 경향성이 유사하게 나타났고, 막장 부분에서 각각 천단침하가 11.1 mm, 10.2 mm로 최대 약 8% 정도 변위 경감효과를 가져다 주는 것으로 파악되었다. 이러한 결과는 강관 자체의 강성만으로는 지반의 변형을 억제하는데 그다지 큰 역할을 할 수 없음을 보여 주는 결과이다.

강관 선단부에 강지보재를 설치한 경우(case 2)도 첫

번째 강관이 설치되는 절점에서 보강을 하지 않은 경우에 비해 약 9%, 두번째 강관이 설치되는 절점에서는 약 13%로 나타나서 강관의 중복시공이 천단침하 경감에 매우 효과적임을 보여주고 있다. 해석 결과 막장 부분이 굴착되면 3열로 겹치는 부분이 발생하게 되는데 이 부분의 천단침하 경감효과는 약 23% 정도였다. 따라서 강관의 선단부 이격거리가 짧아지고, 강지보재의 설치 간격이 좁아지면 이들 강관에 의한 침하경감 효과가 더 크게 나타날 것으로 예상된다. 또한 천단부 굴착면과 가까운 지반내 절점에서의 수직변위는 보강을 하지 않은 경우에 비해 약 20% 정도로 강관만을 타설한 경우에 비해서 더 큰 침하 경감효과를 볼 수 있었다. 이러한 결과는 강관 타설시 강관의 선단부가 강지보재에 의해 지지되기 때문에 강관 자체의 휨저항력을 증대시켜서 지반의 변형을 억제하는 역할을 하는 것으로 판단된다.

그라우팅만을 고려한 경우(case 3)와 그라우팅과 강관을 동시에 고려한 경우(case 4)는 지반거동 경향성이 거의 같게 나타났다. 막장후방 15 m 지점은 다른 여러 경우와 비슷한 천단침하치를 보였지만, 강관이 설치되고 그라우트 작업이 완료된 상태의 지반거동은 주로 그라우트재로 충전된 강화된 지반과 강관의 역할로 인해 천단침하가 급격히 경감되는 경향을 볼 수 있었다. 또한 보강을 하지 않은 경우에 비해 최대 약 44% 정도의 천단침하 경감효과를 볼 수 있었다.

이러한 결과는 본 공법을 시공하는데 있어서 강지보재(steel rib)의 역할이 매우 중요하며, 강관의 선단부 이격거리를 짧게 시공하는 것이 공법의 효과를 극대화시키는 방법이고, 지반 변형의 억제에 가장 중요한 요인으로 그라우팅에 의한 지반의 강화가 관건임을 알 수 있다.

3.3.2 지표침하

도심지 터널 보강은 터널 자체의 안정성을 향상시키는 역할 뿐만 아니라, 인접구조물에 발생할 수 있는 잠재적 손상(potential damage)을 방지할 수 있는 방법으로도 사용되기 때문에 설계자 입장에서는 지표침하거동에 대한 분석이 반드시 필요하다. 따라서 본 연구에서는 횡방향 지표침하를 터널 갱구부로부터 25 m 되는 지점(7 step) 까지 굴착한 후, 터널 중심선으로부터 횡방향으로 각각 0 m, 3 m, 6 m, 10 m, 18 m, 34 m, 54 m 등 총 7점에서의 지표침하 결과를 각 보강 경우별로 비교 분석하였다.

Fig. 10은 터널 갱구부로부터 25 m 지점에서 횡방향

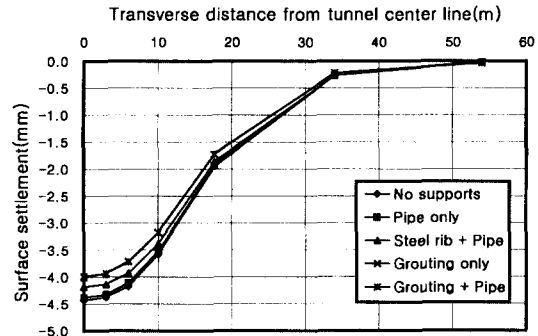


Fig. 10. Transverse surface settlements of surface nodal points

의 거리별 지표침하치를 도시한 것이다. 그림에서와 같이 횡방향 지표침하의 형태는 Peck(1969)이 제안한 정규 확률 분포함수(Gaussian normal probability function)와 유사하게 나타나고 있으며, 최대침하량은 보강하지 않은 경우 4.43 mm, case 1은 4.38 mm로 강관에 의해서는 천단침하에서와 마찬가지로 큰 영향을 주지 못함을 알 수 있다. 강관 선단부에 강지보재를 타설한 경우(case 2)는 4.18 mm로 약 6% 정도 침하 경감효과가 있음을 보여주고 있는데, 이는 강관의 선단부를 강지보재가 지지해 줌으로써 굴착시 지반과 강지보재에 의한 빔효과를 다소 증가시키는 것으로 볼 수 있다.

그라우팅을 고려한 case 3, 4는 보강하지 않은 경우에 비해, 최대 약 19%의 침하 경감효과를 보이고 있다. 또한 거리별로 지표침하량을 보강하지 않은 경우와 비교해 볼 때, case 1은 약 1~2%, case 2는 5~6%, case 3, 4는 10~19%로 그라우팅에 의한 효과가 거리별로 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과는 지반조건 및 터널 심도에 따라서 달라질 수 있지만, 앞서 천단침하의 경우 최대 약 44%와 비교해 볼 때, 지표침하 경감효과보다는 천단침하 억제에 본 공법이 효과적임을 볼 수 있었다.

3.3.3 터널 막장 및 직상부의 수평변위

터널 막장과 막장 직상부에서의 수평변위는 천단침하와 더불어 본 공법의 효과를 직접적으로 비교해 볼 수 있고, 특히, 본 공법이 시공 중 터널 막장을 안정화시키는 공법임을 감안한다면 막장에서의 수평 변위는 매우 중요한 비교 항목임을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 위해 Fig. 11과 같이 터널 막장과 막장 직상부에서부터 지표까지 연결된 20개 절점들의 수평변위가 각각 보강 패턴별로 어떻게 분포하는지를 비교

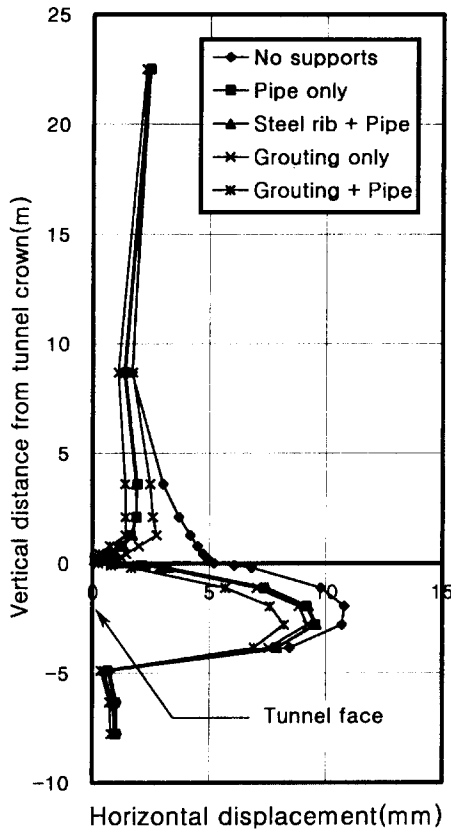


Fig. 11. Horizontal displacements of vertical nodal point to tunnel face

분석하였다.

터널 천정부로부터 23 m 떨어진 지표 결점의 수평변위는 그라우팅과 강관을 동시에 고려한 case 4가 보강하지 않은 경우에 비해, 약 7% 정도 경감효과를 보였고, 이러한 경향성은 막장과 직상부 절점 모두에서 나타났다. 천정부로부터 약 3.6 m 상부에 위치한 절점에서는 보강하지 않은 경우가 3.02 mm, case 1은 1.92 mm로 보강하지 않은 경우에 비해 약 36% 변위경감효과가 있었다. 앞서 천단침하나 지표침하 결과에서 강관 자체의 역할이 약했던 것과는 달리 인접구조물의 안전에 큰 영향을 미칠 수 있는 이러한 수평변위의 경감에는 강관이 매우 큰 역할을 하는 것으로 파악되었다. 또한 case 2는 약 39% 정도로 앞서 천단침하나 지표침하 결과에서 볼 때, 강지보재가 강관의 선단부를 지지하여 침하를 억제하는 역할을 하였지만 수평변위에는 큰 역할을 하지 못함을 알 수 있었다.

또한, 터널 시공이 이루어지는 막장부에서는 수평변

위 억제효과가 뚜렷이 나타나고 있고, 특히 상반 막장부에서는 최대 약 87% 정도의 수평변위 억제효과가 나타나고 있다. 이러한 경향성을 보면, 본 공법에 의한 지반보강효과는 그라우팅 및 강관에 의해서 가장 크게 나타났고, 수평변위 경감에는 앞서와 같이 강관 자체의 역할이 가장 크게 작용하는 것으로 나타났다. 터널 천단부로부터 1.1 m 하단부 지점에서 수평변위는 case 1의 경우 보강하지 않은 경우에 비해 약 65%, case 2는 약 62%, case 3은 약 68%, case 4는 약 87% 정도로 경감되는 것을 볼 수 있었다.

이러한 결과를 종합해 볼 때, 본 공법은 천단침하나 지표침하를 억제하는데 있어서 매우 효과적인 공법임을 알 수 있고, 이 때 강관의 선단부에 강지보재를 설치함으로써 그 효과는 다소 증가함을 알 수 있었다. 또한 막장의 안정에는 강관 자체의 역할이 가장 크게 작용을 하고 있기 때문에 설계시 이를 충분히 고려할 수 있는 방안을 강구할 필요가 있다. 또한 변위 억제 효과만을 본다면 막장에서 수평변위 경감 효과가 가장 크게 발생하는 것으로 나타나고 있어, 본 공법이 막장을 안정화 시키는데 매우 효과적인 공법임을 알 수 있었다.

4. UAM의 설계 인자에 대한 해석

4.1 해석개요

본 절에서는 UAM과 관련된 여러 설계인자가 지반기동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 설계인자로서 대표적인 몇몇 인자에 대해서 매개변수 변환연구를 수행하였다. 이를 위해서 먼저, 해석 조건의 동일성을 유지하면서, 3차원 해석 시간 및 용량을 고려하기 위해 터널 상부 반단면까지를 해석영역으로 설정하여 1/4 symmetry 조건에서 해석을 실시하였다. 물론 1/4 symmetry 조건보다는 1/2 symmetry 조건으로 해석하는 것이 결과치에 있어서 더 정확할 수 있으나, 본 연구에서는 총 37개 모델에 대한 상대적인 비교·분석에 그 목적을 두고 있기 때문에 해석 결과치가 갖는 절대치적인 개념보다는 각 모델들 사이에 비교를 목적으로 하는 상대치임을 밝혀 둔다.

또한 해석 영역내의 지반은 도심지 지하철에서 많이 볼 수 있는 풍화토 및 풍화암 구간으로 설정하였다. 즉, Fig. 12와 같이 터널 crown부 2 m 상부부터 풍화토이고 나머지 부분은 풍화암 구간으로 하였다. Fig. 12(a)

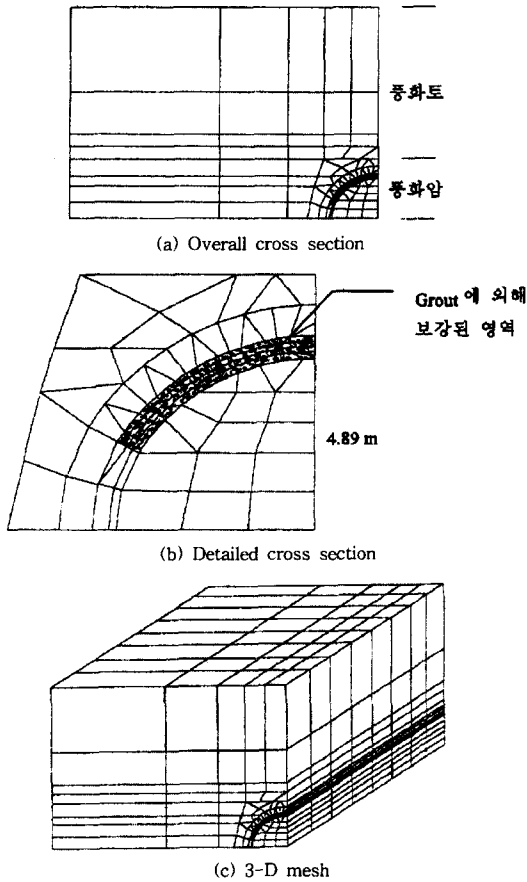


Fig. 12. 3-D FEM model for parametric study on UAM

는 횡단면상의 전체 요소망으로 터널의 단면형상, 지층, 굴착시공순서, 강관위치 등을 고려하여 형성하였고, 요소는 일반적으로 굴착에 따른 응력변화가 크게 발생하는 터널 굴착면 주위에 조밀하게 배치하였다. 그림에서와 같이 경계의 영향을 최소화하기 위해서 해석 영역의 측면 경계와 터널직경의 비를 5 이상으로 하였다. 여기서, 지반조건변화 모델과 토피고 모델은 각각 몇 개의 모델을 대상으로 별도로 구성하였고, 강관자체의 특성이나 배열 등 변화에는 Fig. 12와 동일한 모델을 사용하였다. Fig. 12(b)는 터널부분의 세부 단면과 그라우팅영역을 나타낸 도면이다. Fig. 12(c)는 본 해석모델을 3차원적으로 도시한 유한요소망으로서, 터널 진행 방향으로 강관이 설치되는 영역은 해석의 효율성을 위해서 조밀하게 분할하였고, 양측 경계부는 비교적 넓게 분할하였다. 본 해석에 사용된 3차원 모델의 총 요소수는 1604, 총절점수는 1647 이다. 강관 삽입각도는 3차

원 전산 해석 시간 및 용량을 고려하여 터널 굴진방향과 평행하게 타설되는 것으로 가정하였다.

4.2 해석조건

본 수치해석 연구에서는 UAM과 관련된 설계 인자들에 대한 영향 평가해석을 위해서 다음과 같이 보강을 하지 않은 모델을 포함해서 총 9가지의 해석모델을 선정하였다. 1) 지반조건을 변화시킨 경우(case 1, 2) 토피고를 변화시킨 경우(case 2, 3) 강관길이를 변화시킨 경우(case 3, 4) 강관 C.T.C를 변화시킨 경우(case 4, 5) 강관 중복 열수를 변화시킨 경우(case 5, 6) 강관 선단부 이격거리를 변화시킨 경우(case 6, 7) 강관 단단 그라우팅 영역을 변화시킨 경우(case 7, 8) 강관 두께를 변화시킨 경우(case 8, 9) 강관 직경을 변화시킨 경우(case 9) 등 총 9개의 경우에 대해서 각각 항목별로 합리적인 비교대상을 선정하고, 이에 대한 개별적인 해석을 수행하여 그 결과를 상호·비교하였다.

Fig. 13은 이러한 설계 인자 매개변수 변환연구를 위한 각 해석모델을 보여주고 있다. 또한, 해석에 사용된 지반 및 지보재 물성치는 Table 1, 2와 동일하고 경계조건 및 굴착시공 단계는 Fig. 7과 동일한 과정으로 설정하였다. 특히 본 해석은 Fig. 2와 같이 그라우팅에 의해 구군이 형성된 영역까지를 보요소로 모델링 하였기 때문에, 강관 및 그라우트재 특성이 달라지는 부분에서는 강관의 탄성계수와 단면계수를 변화시키면서 해석을 수행하였다.¹²⁾

4.3 해석결과

본 해석에서는 본 공법과 관련된 설계 인자들의 변화에 따른 지반거동 경감효과를 분석하기 위해서 앞서 제시한 9가지의 설계 인자들에 대한 매개변수 변환 연구를 실시하였다. 지반조건을 변화시킨 경우(case 1)와 터널심도를 변화시킨 경우(case 2)는 본 공법이 시공되지 않은 원지반 상태를 모델별로 각각 동일하게 해석하여 상호·비교하였고, 지반조건 및 터널심도 변화에 따라서도 각 결과를 서로 비교하여 그 경향을 파악하였다. 그리고, 3절에서 볼 수 있었던듯이 여러 해석 결과 중 보강효과를 직접적으로 파악할 수 있었던 천단침하 및 막장수평변위를 주 비교대상으로 하였다.

4.3.1 지반조건 변화(case 1)

본 해석은 지반조건 즉, 압층 및 토층, 암종변화에 따른 UAM의 지반보강 효과를 파악하기 위해서 해석을

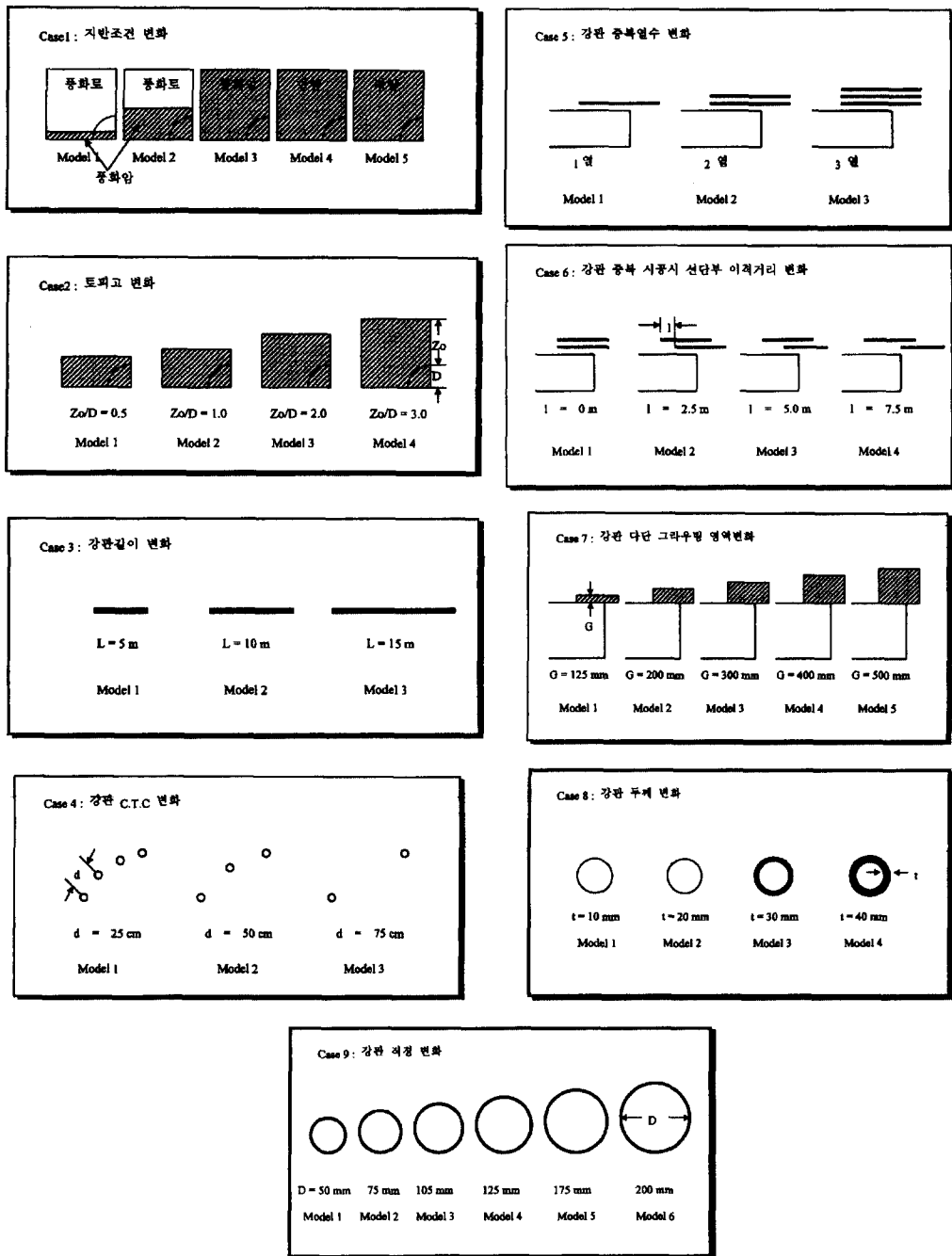


Fig. 13. Models for parametric study on UAM

수행하였다. 따라서 터널심도, 터널형상 및 강관의 특성 등은 동일하게 설정하고, 지반조건만을 변화시켜 Fig. 13의 case 1과 같이 총 5가지 모델을 설정하였다. 지반 조건이 열악한 순서대로 해석 모델을 정하였고, 풍화도

층이 터널 내부에 위치한 경우(model 1), 터널 직상부 2 m 지점까지 풍화토층이 위치한 경우(model 2), 해석 영역 전체가 풍화암층인 경우(model 3), 연암층인 경우(model 4), 경암층인 경우(model 5) 등으로 구성된다.

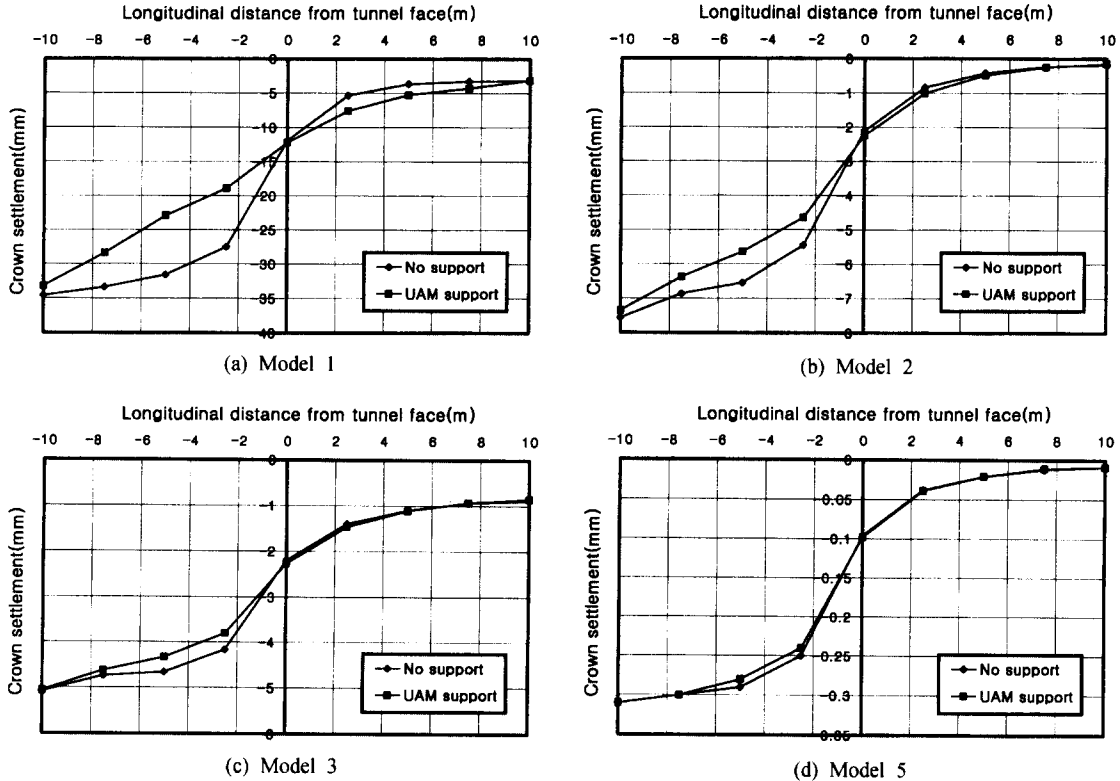


Fig. 14. Crown settlements of longitudinal crown nodal points with variations of ground conditions

Fig. 14는 터널 갱구부로부터 10 m 떨어진 지점까지 굴착했을때, 터널 천정부 종방향 절점들의 천단침하량을 위치별로 나타낸 것이다. 대체로 막장 후방 2.5 m 지점에서 천단침하가 최대로 억제되는 경향성을 볼 수 있었다. 천단침하 경감효과를 보기 위해 보강하지 않은 경우와 비교해 보면 model 1의 경우 약 31%, model 2는 약 15%, model 3는 약 9%, model 4는 약 3%, model 5는 약 1% 정도의 억제 효과가 나타났고, 터널 하부 3 m 지점까지 풍화토가 위치하고 있는 model 1의 경우가 가장 큰 침하 경감효과를 볼 수 있었고, 지반상태가 가장 좋은 경우인 경암 지반의 model 5는 경감효과가 약 1% 정도로 거의 무보강 원지반과 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 또한, 막장부 및 직상부 절점들의 수평변위도 비슷하게 지반상태가 좋아질수록 수평변위 경감효과가 줄어드는 경향성을 나타냈다.

이러한 결과는 본 공법이 지반조건 변화에 따라서 보강 효과가 큰 차이를 보여주는 결과로서 연약한 지반일수록 보강효과가 크게 나타나며, 풍화토 및 풍화암 정도의 지반에 적용하는 것이 가장 타당함을 알 수 있었다.

한편, 연암 및 경암 지반에서는 각각 약 3%, 1% 정도로 보강 효과를 거의 볼 수 없기 때문에 지반 자체의 지지력을 이용하는 설계방법이 적절할 것으로 사료된다.

4.3.2 터널심도 변화(case 2)

본 해석은 터널심도 변화에 따른 UAM의 지반보강 효과를 파악하기 위해서 해석을 수행하였다. 따라서 지반조건과 터널형상, 강관의 특성 등은 동일하게 설정하고, 터널심도만을 변화시켜 Fig. 13의 case 2와 같이 총 4가지 모델을 설정하였다. 여기서 지반조건은 풍화암일 경우를 가정하였고, 터널심도(Z)와 터널직경(D) 비, Z_0/D 가 0.5(model 1), 1.0(model 2), 2.0(model 3), 3.0(model 4)인 경우를 고려하였다.

Fig. 15는 천단침하와 막장수평변위에 대해서 침하억제율 개념을 도입하여 각 경우별로 비교한 그림이다. 분석 결과 보강을 하지 않은 원지반과 비교해 볼 때, 천단침하 경감효과는 model 1, model 2, model 3, model 4가 각각 약 12%, 13%, 14% 정도로 심도가 깊어질수록 경감효과는 커지는 경향을 보이지만, 평균 약 13%

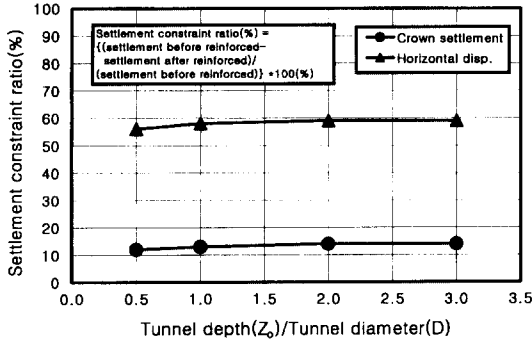


Fig. 15. Comparison between tunnel depth ratio (Z_0/D) and settlement constraint ratio

정도로 터널심도별로 큰 차이를 보이지 않는 것으로 분석되었다. 마찬가지로 막장수평변위도 56%, 58%, 59% 정도로 평균 약 58%로 큰 차이를 보이지 않았지만 천단 침하에 비해 막장수평변위의 억제효과가 큰 것으로 나타났다.

이러한 결과는 본 공법을 설계하는데 있어서는 터널 심도보다는 지반조건에 더 큰 비중을 두고 설계를 해야 한다는 단적인 예를 보여주는 결과이다.

4.3.3 강관길이 변화(case 3)

본 해석은 여러 설계 인자 중 하나인 강관의 길이를 변화시켰을 경우, 지반보강 효과를 비교·분석하였다. 앞서 터널 심도 변화와 마찬가지로 풍화도가 터널 상부 2 m 지점에 위치하고, 그 하부는 풍화암인 경우를 가정하였다. 또한 터널심도는 20 m 이고, 강관은 3열로 중복 시공되는 경우를 고려하였다. Fig. 13의 case 3과 같이 강관의 길이(L)는 단관 mini pipe 정도의 길이(5 m)에서부터 가장 많이 사용하고 있는 강관의 길이(15 m)까지 각각, 5 m(model 1), 10 m(model 2), 15 m(model 3) 등 세가지 경우를 비교하였다.

Fig. 16은 천정부 절점의 위치별 천단침하량을 나타낸 것이다. 막장 후방 2.5 m 지점에서 L=10, 15 m 인 경우가 비슷하게 L=5 m에 비해 약 17%의 침하 억제 효과가 있었다. 또한, 막장부 및 직상부 절점들의 수평 변위를 분석한 결과, 천정 상부 2 m 지점에서 L=5 m 기준으로 L=10 m는 약 26%, L=15 m는 약 29%의 경감효과를 보여서 L=10, 15 m가 비슷한 결과를 보였다. 한편, 천정부에서는 L=5 m 경우에 비해 각각 약 48%, 62% 정도의 수평변위 억제 효과가 있는 것으로 나타나서 강관의 길이 변화가 막장을 안정화시키는데 매우 중요한 매개변수임을 파악할 수 있었다. 특히, 지반조건

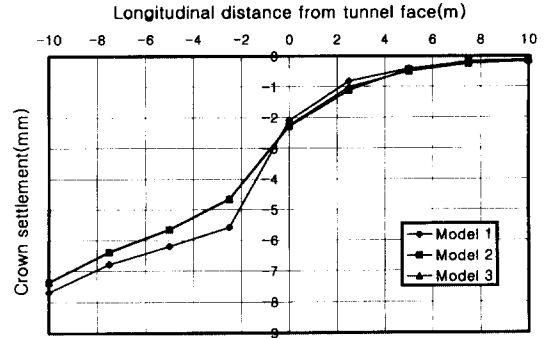


Fig. 16. Crown settlements of longitudinal crown nodal points with variations of pipe length

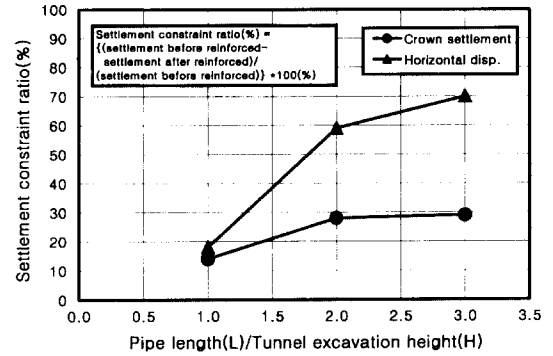


Fig. 17. Comparison between tunnel pipe length ratio (L/H) and settlement constraint ratio

에 따라서 달라질 수 있지만 본 연구 결과에 따르면 터널의 굴착 높이(H=4.89 m)에 비해, 강관의 길이(L)가 최소한 2 H 이상일 때 침하 억제 효과와 막장의 안정성이 극대화 될 수 있음을 보여주고 있다(Fig. 17). 지반이 연약하여 강관 보강효과를 크게 얻을 필요가 있는 현장에서는 강관의 중첩시공 길이가 길어야 하는 경우는 통상 15 m~18 m 정도가 바람직하고, 터널 굴진방향으로의 강관 중첩도를 크게 높이지 않아도 되는 현장에서는 12 m~15 m가 적합한 것으로 분석되었다.

4.3.4 강관의 C.T.C를 변화시킨 경우(case 4)

본 해석은 여러 설계 인자 중 하나인 강관의 C.T.C(d)를 변화시켰을 경우, 지반보강 효과를 비교·분석하였다. 지반조건 및 터널 심도, 강관의 3열 중복 시공은 앞서의 경우와 동일하게 고려하였다. 강관의 C.T.C는 Fig. 13의 case 4와 같이 현장에서 자주 사용되고 있는 경우를 비교 대상으로 하여 각각 25 cm(model 1), 50 cm(model 2), 75 cm(model 3) 등 세가지 경우를 비교·분석하였다.

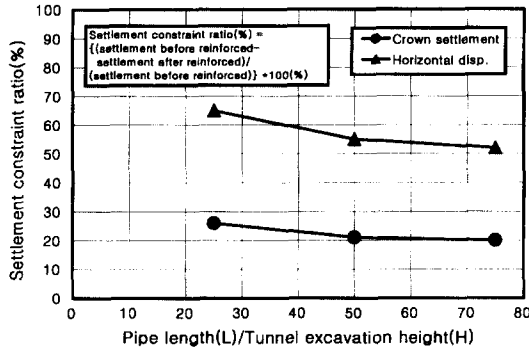


Fig. 18. Comparison between C.T.C and settlement constraint ratio

Fig. 18은 천단침하와 막장 수평변위에 대해서 침하 억제율 개념을 도입하여 각 경우별로 비교한 그림이다. 그림에서는 보강하지 않은 원지반에 비해 천단침하 억제율은 최대 약 26%(model 1) 정도로 나타났고, 막장 수평변위 억제율은 최대 약 65%(model 1) 정도를 보였다. 특히 본 모델에서 강관이 시공되는 구간은 풍화암 구간으로서 앞서 지반조건 변화 결과(Fig. 15)에 의하면, 지반조건이 안 좋을수록 변위 억제 효과가 커지므로 연약한 지반에서는 C.T.C 간격변화에 민감한 결과를 보일 것으로 예상된다. 본 모델에서는 C.T.C가 50 cm(model 2)인 경우를 보강효과 극대화를 위한 한계치로 보는 것이 타당할 것으로 사료된다.

따라서, 강관의 최적 C.T.C는 강관의 휨특성과 그라우트재의 주입범위 등, 여러 가지 요소들을 고려하여 결정하게 되나 국내의 풍화암 구간에서는 40~50 cm 간격이 적합하고, 풍화토의 경우는 40 cm 이하로 조정, 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

4.3.5 강관 중복열수를 변화시킨 경우(case 5)

본 해석은 여러 설계인자 중 하나인 강관의 중복열수가 변할 경우, 지반보강 효과를 비교·분석하였다. 지반조건 및 터널 심도는 앞서의 경우와 동일하게 고려하였고, 강관의 길이는 15 m로 고려하였다. 강관의 중복 열수는 Fig. 13의 case 5와 같이 현장에서 자주 사용되고 있는 경우를 비교 대상으로 하여 각각 1열(model 1), 2열(model 2), 3열(model 3) 등 세가지 경우를 비교·분석하였다.

Fig. 19는 천정부 절점의 위치별 천단침하량을 나타낸 것이다. 막장 전방 2.5 m 지점에서 최대 효과를 보이며, 그 값은 2열의 경우에 1열의 경우에 비해 약 6%, 3열의 경우는 1열의 경우에 비해 약 10% 정도의 침하

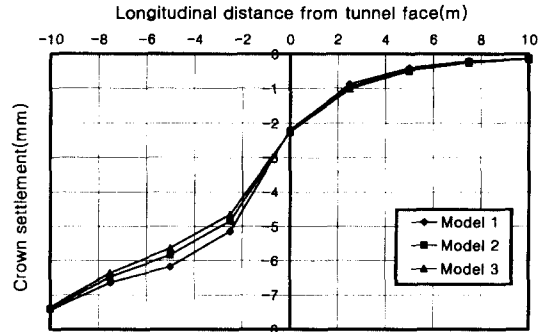


Fig. 19. Crown settlements of longitudinal crown nodal points with variations of pipe overlap length

경감 효과를 보여주고 있다. 막장부 수평변위는 천정부에서 1열 시공을 기준으로 할 경우 2열의 경우는 약 9%, 3열의 경우는 약 15% 정도의 변위억제 효과를 보였다.

여기서도 마찬가지로 막장부의 변위 억제 효과가 천단침하 억제 효과보다 크게 나타났다. 따라서 터널 갱구부를 안정화시킬 경우나, 극히 불량한 지반조건, 막장 및 막장 상부에 굴착 영향을 최소화 해야 하는 경우, 대단면 터널시공시, 하저 터널 시공시 등의 경우에는 최소한 2열 이상의 중복시공을 권장한다.¹²⁾

4.3.6 강관 선단부 이격거리를 변화시킨 경우(case 5)

본 해석은 여러 설계변수중 하나인 강관의 선단부 이격거리(l)를 변화시킬 경우, 지반보강 효과를 비교·분석하였다. 지반조건 및 터널 심도는 앞서의 경우와 동일하게 고려하였고, 강관의 길이는 10 m, 강관의 중복열수는 비교를 위해 2열로 고려하였다. 강관의 선단부 이격거리는 Fig. 13의 case 6과 같이 각각 l=0 m(model 1), 2.5 m(model 2), 5.0 m(model 3), 7.5 m(model 4) 등 네가지 경우를 비교·분석하였다.

Fig. 20은 천단침하와 막장수평변위에 대해서 침하 억제율 개념을 도입하여 각 경우별로 비교한 그림이다. 그림에서 보면 굴착부에서는 이격거리가 짧을수록 침하경감 효과가 큰 것으로 나타났고, 특히, 막장수평변위 경감에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 보강하지 않은 지반에 비해 천단침하는 최대 약 75%, 막장수평변위는 약 27% 정도로 나타났고, 강관 선단부 이격거리와 강관 길이의 비가 0.5 정도(model 3)가 보강 효과를 극대화하기 위한 한계치로 판단된다.

이러한 결과는 앞서 강관의 길이를 변화시킨 경우에서 보여준 결과와 마찬가지로 선단부 이격거리가 막장

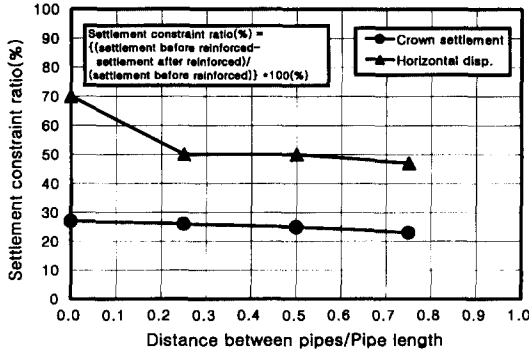


Fig. 20. Comparison between distance of pipes and settlement constraint ratio

부의 안정성에 매우 중요한 역할을 하고 있음을 보여주는 결과이다. 따라서 강관의 길이를 길게 하고, 강관의 선단부 이격거리를 가능하면 짧게 설계하는 것이 막장의 안정성을 증진시키는 효과적인 방법으로 사료된다. 통상적으로 시공성을 고려한 강관 선단부 이격거리는 강관 설계 길이의 2/3~3/4 정도가 적합하다고 제안하고 있으나, 본 해석 결과 지압문제나 지반거동 문제로 인해 강관의 중복시공이 요구되는 경우는 강관의 설계 길이의 1/2~1/4 정도로 강관의 중복도를 높이는 것이 보강효과를 극대화시키는 방편으로 분석되었다.

4.3.7 그라우팅 영역을 변화시킨 경우(case 7)

본 해석은 그라우팅 영역(G)을 변화시킬 경우 지반 보강 효과를 비교·분석하고자 하였다. 지반조건 및 터널 심도는 앞서의 경우와 동일하게 고려하였고, 강관의 길이는 15 m, 강관의 중복열수는 3열로 고려하였다. 그라우팅 영역은 현장 상황을 고려하여 Fig. 13의 case 7과 같이 각각 G=125 mm(model 1), 200 mm(model 2), 300 mm(model 3), 400 mm(model 4), 500 mm(model 5) 등 다섯가지 경우를 비교·분석하였다.

Fig. 21은 천정부 절점의 위치별 천단침하량을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 그라우팅 영역을 최대로 했을 경우(G=500 mm)가 최소 그라우팅 영역을 고려한 경우(G=125 mm)에 비해 최대 15% 정도 변위 억제효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 막장부 수평변위는 터널 천정부에서는 최대 25% 정도 변위 억제효과를 보였다. 대체적으로 그라우팅 영역이 넓어질수록 천단침하 및 수평 변위 억제효과가 커지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 앞서 강관의 중복열수를 변화시킨 경우와 유사한 경향성을 보이는 것으로 중복열수의 선정이 결국 그라우팅 영역을 결정해 주기 때문에 지반특성 및

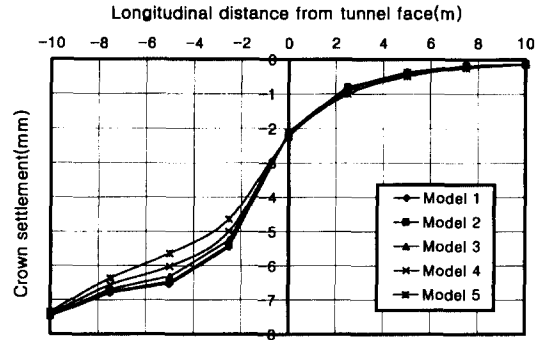


Fig. 21. Crown settlements of longitudinal crown nodal points with variations of grouting zone

터널 규모에 따라서 신중한 검토 후 선정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4.3.8 강관 두께를 변화시킨 경우(case 8)

본 해석은 강관의 특성 중 강관의 두께(t)가 변할 경우, 지반보강 효과를 비교·분석하였다. 지반조건 및 터널 심도는 앞서의 경우와 동일하게 고려하였고, 강관의 길이는 15 m, 강관의 중복열수는 3열로 고려하였다. Fig. 13의 case 8과 같이 각각 t=10 mm(model 1), 20 mm(model 2), 30 mm(model 3), 40 mm(model 4) 등 네가지 경우를 비교·분석하였다.

Fig. 22는 천정부 절점의 위치별 천단침하량을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 강관 두께를 최대로 했을 경우(t=40 mm)가 최소 강관 두께(t=10 mm)을 고려한 경우(G=125 mm)에 비해 최대 6% 정도 변위 억제효과가 있는 것으로 나타났다. 수평변위도 거의 차이가 나지 않고 있는데, 터널 천정부에서 4% 정도로, 강관 자체의 두께 변화에 의해서는 큰 영향이 없음을 보여주고 있다.

4.3.9 강관 직경을 변화시킨 경우(case 9)

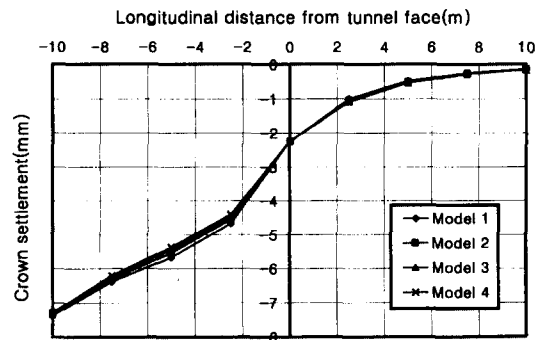


Fig. 22. Crown settlements of longitudinal crown nodal points with variations of pipe thickness

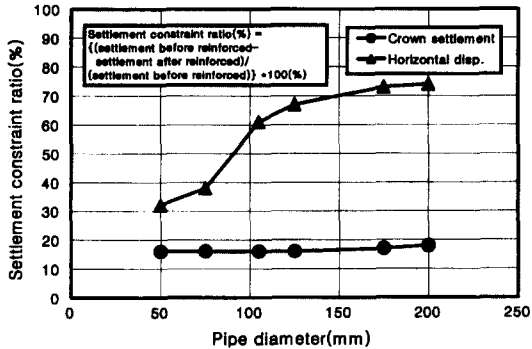


Fig. 23. Comparison between pipe diameter and settlement constraint ratio

본 해석은 강관의 특성 중 강관의 직경(D)가 변할 경우, 지반보강 효과를 비교·분석하였다. 지반조건 및 터널 심도는 앞서의 경우와 동일하게 고려하였고, 강관의 길이는 15 m, 강관의 중복열수는 3열로 고려하였다. Fig. 13의 case 9와 같이 각각 D=50 mm(model 1), 75 mm(model 2), 105 mm(model 3), 125 mm(model 4), 175 mm(model 5), 200 mm(model 4) 등 네가지 경우를 비교·분석하였다.

Fig. 23은 천단침하와 막장수평변위에 대해서 침하 억제율 개념을 도입하여 각 경우별로 비교한 그림이다. 강관 직경이 105 mm(model 3) 이상부터 막장수평변위가 급격한 억제효과를 보이고 있음을 알 수 있으며, 천단침하는 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

따라서 막장의 안정성을 극대화시키기 위해서는 천공장비와 시공성을 고려해서 가능하면 직경이 105 mm 이상의 강관을 사용하는 것이 보강효과 극대화를 위한 방편임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 UAM의 지반보강 효과확인을 위한 3차원 유한요소 해석과 설계인자에 대한 매개변수 변환 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 여러 연구자의 연구결과에 의하면, UAM은 터널 천단부의 변형억제 효과와 굴착중 터널 막장부의 안정성에 매우 효과적인 공법으로 제안하고 있다. 특히, 강관에 의한 상재하중 지지, 그라우팅에 의한 차수 역할이 본 공법의 주요 보강효과임을 밝혔다.

2) UAM의 보강효과를 분석하기 위한 3차원 유한요소해석 결과, 본 공법은 천단침하나 지표침하 및 막장

부 수평변위를 억제하는데 매우 효과적인 공법임을 알 수 있었다. 지반조건에 따라서 달라질 수 있지만 본 해석 결과에서는 지표침하의 경감효과(최대 19%) 보다는 천단침하 억제 효과(최대 44%)가 큰 것으로 밝혀졌으며, 막장의 수평변위 억제 효과가 가장 크게 나타났다. 보강하지 않은 지반에 비해 최대 약 87%의 수평변위 억제 효과를 보여서 본 공법이 막장의 안정성을 증진시키고, 천단침하를 억제하는데 보다 효과적임을 알 수 있었다. 천단침하의 경우는 강관 선단부에 강지보재를 설치하는 것이 상재하중 지지효과를 극대화시키는 방안으로 분석되었고, 강관 자체의 뒨 효과에 의한 수평변위 억제가 막장의 안정에 기여한다는 사실을 알 수 있었다.

3) UAM 설계인자에 대한 매개변수 변환 연구 중 지반조건과 터널심도에 대한 해석결과는 다음과 같다. 먼저, 지반조건 변화에 의한 해석결과 보강하지 않은 지반과 비교해 볼 때, 지반조건별로 약 31%, 15%, 9%, 3%, 1% 정도 경감효과가 있는 것으로 나타나서 불량지반에 공법을 적용할수록 변형억제 효과가 우수한 것으로 분석되었다. 대체적으로 풍화도 및 풍화암 지반에 본 공법을 적용하는 것이 타당하고, 연암 및 경암 지반에서는 보강효과가 크게 나타나지 않기 때문에 지반 자체의 지지력을 이용하는 설계 방법이 적절할 것으로 사료된다. 또한, 터널심도비(Z_0/D)를 0.5~3 까지 변화시킨 해석결과에서는 보강하지 않은 지반에 비해 평균 약 13% 정도로 터널심도별로 큰 차이를 보이지 않아서 지반보강 효과에는 터널심도보다는 지반조건에 더 큰 비중을 두고 설계를 해야할 필요가 있는 것으로 파악되었다.

4) UAM 설계 인자 중 본 공법의 시공성에 관련된 매개변수 변환 연구에 따르면, 보강효과에 가장 큰 영향을 미치는 인자로는 강관길이를 들 수 있으며, 터널 굴착높이(H)에 비해 강관의 길이가 최소한 2H 이상일 때, 천단침하 억제효과와 막장 안정성이 극대화 될 수 있는 것으로 분석되었다.

5) 한편, 천단침하 및 막장의 안정에는 강관의 C.T.C, 강관 중복열수, 강관 선단부 이격거리 등이 중요한 역할을 하는 설계 인자로 파악되었다. 즉, 연약지반에서 본 공법을 적용할 경우 시공성이 보장된다면, 강관의 C.T.C를 40 cm 이하, 강관의 중복열수를 2열 이상, 그리고 강관 선단부 이격거리를 강관 설계길이의 1/2~1/4 정도로 설계하는 것이 천단침하 억제 및 막장의 안정을 극대화시킬 수 있는 방법으로 분석되었다.

6) 또한 강관 자체의 특성 변화에 대한 매개변수 변환연구에서는 강관과 그라우팅의 유효 단면적을 크게 할수록 터널 막장의 안정성이 커지는 경향성을 보여서 본 공법 설계시 이를 고려할 필요가 있다고 판단된다

6. 향후 연구 분야

본 연구에서는 UAM의 지반보강효과 및 각종 설계 인자에 대한 매개변수 변환연구를 수행하였다. 이러한 결과를 바탕으로 향후에는 본 공법이 적용된 실제 현장의 많은 설계 및 시공자료를 토대로 다양한 현장 적용성 연구가 뒤따라 주어야 할 것으로 사료된다. 아울러 본 공법에서는 다루지 못했던 그라우트재에 의한 암반 절리 충전효과와 강관에 의한 절리 봉합효과 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 김형탁, 김학문 외 1인 1995, "3차원 터널 해석에 의한 강관 다단그라우팅의 보강효과," '95 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp. II-25~II-38.
- 배규진, 김창용 외 2인, 1997, "Umbrella Arch 공법에 의한 터널 천단부 보강시 주변 지반의 거동에 관한 연구," 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, 제 7권, 제 4호, pp. 299-309.
- 배규진 외 5인, 1994, "강관 보강형 다단 그라우팅 병용공법의 개발 연구," '94 대한토목학회 추계학술발표회 논문집, pp. 763-766.
- 배규진, 김창용 외 3인, 1994, "Umbrella 공법에 의한 터널 천단부 보강시 주변지반의 변위 연구," '94 한국지반공학회 추계학술발표회 논문집, pp. 217-224.
- 유충식, 김연정 외 2인, 1995, "3차원 유한요소해석에 의한 Umbrella Arch 공법으로 보강된 터널의 거동 해석," '95 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp. II-11~II-16.
- 이봉렬, 김학문 외 1인, 1996, "3차원 터널 해석에 의한 강관보강형 다단그라우팅의 보강효과," 한국지반공학회지, 제 12권, 제 4호, pp. 3-20.
- (주)지오텍 엔지니어링, 1994, "강관보강형 다단 그라우팅 공법의 개발," 연구보고서, pp. 104-124.
- 최용기, 김창용 외 2인, 1997, "연약지반 터널 굴착시의 지반보강 사례연구," '97 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, pp. 133-139.
- 한국건설기술연구원, 1985, "지반침하방지공법에 관한 연구," 전기연 85-W-2, pp. 308.
- 한국건설기술연구원, 1986, "지하굴착보조공법의 설계와 시공에 관한 연구," 전기연 86-GE-2, pp. 200-220.
- 한국건설기술연구원, 1995, "지하 생활공간 개발 요소 기술 연구; 지반굴착 기술분야(II)," pp. 3-1~3-108.
- 한국건설기술연구원, 1996, "지하 생활공간 개발 요소기술 연구; 지반굴착 기술분야(III)," pp. 139-188.
- 高根昇, 1982, "土木特殊工法シリーズ:推進工法," 森北出版株式會社, pp. 107-204.
- 南野念久, 1983, "推進工法の設計と施工," 森北出版株式會社, pp. 239-287.
- 社団法人 土質工學會, 1992, "薬液注入工法における注入効果の豫測確手法に関するシンポジウム," pp. 100-144.
- 山本 念, Pagliacci, F., 1992, "Aosta谷の道路トンネル群にみる新工法," *トンネル地下*, 第 23卷, 第 1號, pp. 21-28.
- 小泉光政, 合田和哉, 1990, "土砂地山に土かぶりの薄い3車線トンネル掘る(その2)," *トンネル地下*, 第 21卷, 第 6號, pp. 43-51.
- 松尾新一郎, 河野輝一郎, 1982, "地下水位低下工法," 鹿島出版會, pp. 125-147.
- 水本明喜, 天野光也, 1991, "住宅密集地における地下水位下での土砂 NATM," *トンネル地下*, 第 22卷, 第 2號, pp. 17-23.
- 五十嵐陸重, 1978, "地下水と地盤沈下対策," 株式會社 百亞書房, pp. 189-200.
- Barisone, G., Pigorini, B., Pelizza, S., 1982, "Umbrella Arch Method for Tunnelling in Difficult Conditions-Analysis of Italian Cases," *Proc. 4th Cong. Inter. Assoc. of Engineering Geology*, New Delhi, Vol. 4, pp. 15-27.
- Bruce, D. A., Gallavresi, F., 1988, "Special Tunnelling Methods for Settlement Control: Infilaggi and premilling," *Proc. 2nd Inter. Conf. on Case histories in Geotechnical Engng.*, pp. 1121-1126.
- Durand, J. P., Peffayet, M., Jassionnesse, C & Reith, J. H., 1994, "Surface Settlements in Urban Tunnelling works: Design Approach for Toulon Underground Motorway Crossing," *Tunnelling and Ground Conditions*, Abdel Salam (ed), Balkema.
- Eisenstein, Z., Ezzeldine, O., 1992, "The Effect of Tunnelling Technology on Ground Control," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 7, No. 3, pp. 273-279.
- Fathalla, E. N., 1992, "Construction Monitoring of Urban Tunnels and Subway Stations," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 7, No. 4, pp. 425-439.
- Kim, K. J., Piepenburg, Merkle, D., 1986, "Influence of the Intermediate Principal Stress on Rock Tunnel Behavior," Applied Research Associates, Inc. Alexandria, VA.
- Kotake, No., Yamamoto, Y., Oka, Ko., 1994, "Design for Umbrella method based on Numerical Analyses and Field Measurement," *Tunnelling and Ground Conditions*, Abdel Salam (ed), Balkema, pp. 501-508.
- Mahtab, M. A., Grasso, P., 1992, "Geomechanics Principles in the Design of Tunnels and Caverns in Rocks," Elsevier, pp. 144-156.

29. Pelizza, S., Peila, D., 1993, "Soil and Rock Reinforcements in Tunnelling," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 8, No. 3, pp. 357-372.
30. Pelizza, S., Peila, D. & Oreste, P. P., 1994, "A new approach for ground reinforcing design in tunnelling, soil and Rock Reinforcements in Tunnelling," *Tunnelling and Ground Conditions*, Abdel Salam (ed), Balkema, pp. 517-522.
31. Pelizza, S., Corona, G., Grasso, F., Raineri, R., 1994, "Improvement of stability conditions from half to full face excavation in difficult geotechnical conditions," *Tunnelling and Ground Conditions*, Abdel Salam(ed), Balkema, pp. 267-271.
32. Peila, D., 1994, "A Theoretical Study of Reinforcement Influence on the Stability of Tunnel Face," *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 145-168.
33. Societa Italiana Gallerie, 1991, "Tunnelling in Italy : 1990," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 6, No. 3, pp. 299-316.
34. S. W. Hong and G. J. Bae., 1994, "Ground Movements Associated with Subway Tunneling in Korea," *Proc. of the Inter. Sym. on Underground Construction in Soft Ground*, New Delhi, pp. 229-232.
35. Swoboda, G., Wagner, H., 1993, "Design based on numerical modelling a requirement for an economical tunnel construction," *Proceedings of Rapid Excavation and Tunnelling Conference*, pp. 368-379.
36. Yunfeng, L., 1990, "Pipe Roof Supporting Method in Karst and Fill Section of Nanling Tunnel," *Proc. of the Inter. Cong. The ITA Annual Meeting*, pp. 235-241.
37. Zirong, Z., Yanging, L., Sihai, L., 1990, "Pressure and Deformation Measurement in Fenglin Tunnel," *Proc. of the Inter. Cong. The ITA Annual Meeting*, pp. 235-241.