

UAM 효과 평가를 위한 현장실험 및 정량적 2차원 수치해석기법 개발에 관한연구

김대영^{1*}, 이홍성², 천병식³, 정종주⁴

A study on the field tests and development of quantitative two-dimensional numerical analysis method for evaluation of effects of umbrella arch method

Dae-Young Kim, Hong-Sung Lee, Byung-Sik Chun, Jong-Ju Jung

Abstract Considerable advance has been made on research on effect of steel pipe Umbrella Arch Method (UAM) and mechanical reinforcement mechanism through numerical analyses and experiments. Due to long analysis time of three-dimensional analysis and its complexity, un-quantitative two-dimensional analysis is dominantly used in the design and application, where equivalent material properties of UAM reinforced area and ground are used. For this reason, development of reasonable, theoretical, quantitative and easy to use design and analysis method is required. In this study, both field UAM tests and laboratory tests were performed in the residual soil to highly weathered rock; field tests to observe the range of reinforcement, and laboratory tests to investigate the change of material properties between prior to and after UAM reinforcement. It has been observed that the increase in material property of neighboring ground is negligible, and that only stiffness of steel pipe and cement column formed inside the steel pipe and the gap between steel pipe and borehole contributes to ground reinforcement. Based on these results and concept of Convergence Confinement Method (CCM), two dimensional axisymmetric analyses have been performed to obtain the longitudinal displacement profile (LDP) corresponding to arching effect of tunnel face, UAM effect and effect of supports. In addition, modified load distribution method in two dimensional plane-strain analysis has been suggested, in which effect of UAM is transformed to internal pressure and modified load distribution ratios are suggested. Comparison between the modified method and conventional method shows that larger displacement occur in the conventional method than that in the modified method although it may be different depending on ground condition, depth and size of tunnel, types of steel pipe and initial stress state. Consequently, it can be concluded that the effect of UAM as a beam in a longitudinal direction is not considered properly in the conventional method.

Keywords: Effect of umbrella arch method, convergence confinement method, axisymmetric analysis, plane-strain condition, internal pressure

요지 UAM(Umbrella Arch Method)의 효과 및 역학적 보강매커니즘에 대한 연구는 국내외에서 수치해석 및 실험 등을 통하여 상당한 진척이 이루어졌으나 실제 설계 및 적용에 있어서는 아직도 3차원 해석의 해석시간과 복잡성 등의 제약 때문에 UAM의 보강영역과 지반과의 환산물성을 이용하는 정량적이지 못한 2차원해석이 주로 사용되고 있다. 이러한 이유로 합리적, 이론적, 정량적이면서도 손쉽게 수행할 수 있는 설계 및 해석기법이 요구되고 있다. 본 연구에서는 UAM의 보강효과가 미치는 범위를 파악하고 그라우팅 전·후의 강관주변지반 물성변화를 파악하기 위하여 연직방향의 UAM 현장실험 및 실내시험을 수행하였다. 풍화토, 풍화암 지반에 UAM 적용시 그라우트의 주입에 의한 주변지반의 물성치 증가는 미미하며, 강관외부와 천공구경 사이의 공간 및 강관내부에 형성된 시멘트구근과 강관의 강성만이 지반보강 효과에 기여한다는 것을 확인하였다. 이러한 결과와 내공변위제어법(CCM; Convergence Confinement Method) 개념을 바탕으로 2차원 축대칭해석을 실시하여 박장효과, UAM효과와 지보재효과를 종단변위곡선(LDP)으로 나타내었다. 또한, 2차원 평면변형률 해석시 UAM의 지보효과를 내압의 크기로 변화하여 이를 고려하는 하중분담법을 제안하였다. 이 방법과 기존의 등가환산물성을 적용하는 해석을 비교한 결과, 지반조건, 터널의 심도 및 크기, 강관조건, 초기응력상태 등에 따라 차이가 있지만, 기존의 해석방법에서의 변위량이 새로운 방법에 비해 더 크게 발생하는 것으로 나타나, UAM의 중방향 빔 지지효과를 제대로 평가하지 못하는 것으로 나타났다.

주요어: UAM 효과, 내공변위제어법, 축대칭 해석, 평면변형률 조건, 내압

*정회원, 현대건설(주) 기술개발원, 수석연구원 (E-mail: dykim@hdec.co.kr)

²정회원, 현대건설(주) 기술개발원, 선임연구원 (E-mail: hongsung@hdec.co.kr)

³정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (E-mail: hengdang@unitel.co.kr)

⁴정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (E-mail: daeboeng@chol.com)

1. 서 론

최근 급격히 진행되는 도시화에 따라 도심지 구간의 교통 문제 해소를 위해 지하철, 지하차도 등의 건설을 위한 도심지 천층 터널의 필요성이 급격히 증가하고 있다. 천층 토사 터널은 자립을 위한 아치효과가 발현될 수 있는 충분한 높이의 토피고를 확보할 수 없고, 상부 지질조건이 불량하여 안전성 확보에 많은 어려움이 있다(터널공학회, 2007). 일반적으로 강도가 낮고 자립도가 낮은 지반에서 터널 굴착의 안정성 확보를 위해 특수 분할 굴착 공법의 적용과 더불어, 강관 그라우팅에 의한 천단부 보강 등 다양한 종류의 지반 보강 공법 및 보조 지보공법이 적용되고 있다. 보조공법 중 Umbrella Arch Method는 기존 공법들의 문제점을 보완하기 위하여 개발된 공법으로서 70년대 중반 이탈리아에서 개발되었고 일본에서 자국의 실정에 맞게 열악한 지반조건에서 사용되고 있으며, 국내에서는 80년대 초부터 지하철공사에 사용되기 시작하여 지반이 불량한 NATM 터널의 보조공법으로서 가장 널리 사용되고 있다.

최근 들어 UAM에 대한 연구가 많이 수행되었으며, 그 분야로는 시공사례 및 계측분야, 수치해석 분야 그리고 모형실험분야로 나눌 수 있다. 시공사례 및 계측분야에 대한 연구로는 UAM을 적용하였을 때의 막장의 안정효과와 터널주변지반의 개량효과, 터널 주변지반의 거동특성을 등을 분석한 것이 있다(Barisone et al., 1982; Pelizza and Peila, 1993; Pelizza at al., 1994(a); 최용기, 1997; 배규진 등, 1997). 수치해석에 의한 연구는 매개변수변환에 의한 UAM의 보강효과를 평가하고 지표침하량을 예측하는 연구가 있다(Pelizza et al., 1994(b); 김창용 등, 1998; 김선흥 등, 2002). UAM의 보강 메커니즘에 대한 연구로는 Oreste et al.(1998), 차민웅 등(2004)의 연구가 있다. 한편 UAM의 설계법에 대한 연구로는 장석부 등(2002)이 UAM의 설계변수를 고찰하고 막장지지에 요구되는 보강량을 정량적으로 구조계산 할 수 있는 범-스프링모델을 제안하였다. 박과 임(2004)은 현장계측을 통하여 UAM의 거동을 분석하고 설계 시 적용할 수 있는 하중계와 강관길이, 중첩사공거리, 횡방향 설치 간격 등을 결정할 수 있는 설계법을 제안하였다.

이상의 연구들에서 UAM의 보강효과와 보강메커니즘 등은 밝혀졌으나, 실제로 터널 설계를 위해서는 3차

원 수치해석을 실시하여야만 UAM의 하중분담효과와 잉여하중이 지보재로 부과되는 효과를 제대로 파악 할 수 있다. 그러나 3차원 수치해석에는 많은 시간과 노력이 소모되는 이유로 실무에서는 주로 UAM 보강부를 지반과의 합성요소로 간주하여 등가환산 물성치를 적용하는 2차원 평면변형률 해석에 의존하여 지보재의 부재력이 허용치내에 있는지 만을 검토하는 설정이다. UAM과 지반의 등가환산물성치의 산정은 계산에 의해 환산 물성을 적용하는 방법과 대상지반의 변형계수 및 접착력을 일정비율로 증가시켜서 사용하는 방법 등이 적용되고 있으나 두 가지 방법 모두 정확한 근거는 없는 상태로서 2차원 해석의 신뢰성을 떨어뜨리는 요인이 되고 있다. 또한 UAM 적용시 가압 그라우팅에 의한 시멘트 구근의 범위를 어디까지로 결정하느냐에 따라서도 환산 물성치에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 UAM의 현장 시험시공 및 현장실험과 실내시험 등을 통하여 UAM 설치에 의한 시멘트 구근의 범위와 UAM 주변지반의 물성치 변화를 파악하였다. 축대칭해석과 평면변형률 상태의 2차원 수치해석을 동시에 수행하여 지반물성, 토압크기, 강관의 사이즈, 강지보의 유·무, 솗크리트의 유·무에 따른 축대칭 해석결과의 변위가 평면변형률 해석에서의 변위에 일치하는 내압을 구하여 막장의 하중분담률, UAM의 하중분담률을 각각 분리하여 UAM의 지보효과를 정량적으로 파악하여 실제모델의 해석에 UAM의 지보효과를 환산물성치가 아닌 하중분담률로서 내압으로 지지하는 방법을 제안하고 제안한 해석방법과 기존 해석방법을 비교하였다.

2. UAM 효과 파악을 위한 현장시험 및 실내시험

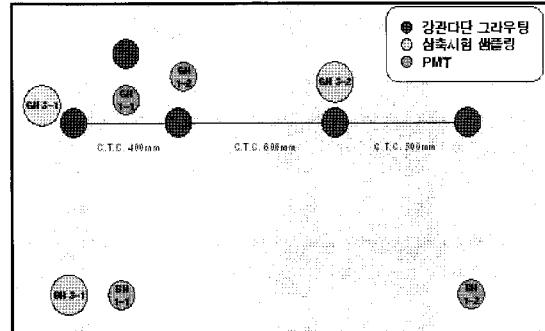
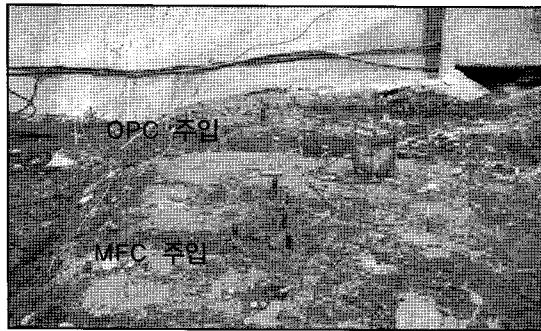
UAM의 적용시 가압그라우팅에 의한 지반보강의 범위와 효과를 파악하기 위하여 현장 시험시공 후, 원지반 및 보강지반에서 SPT, 공내재하시험 및 탄성파시험을 실시하여 원지반과 보강지반의 물성을 비교하였다. 또한 채취된 시료를 대상으로 삼축압축시험도 수행하였다.

2.1 UAM의 현장시험 개요

UAM 시험시공은 안산암질 풍화토 지반에서 수행되었으며, 마이크로 시멘트(MFC) 주입 강관 5공과 보통 포틀랜트 시멘트(OPC) 주입 강관 5공, 총 10공의 강관

표 1. UAM 현장시험 요약

Dia. of borehole	Dia. of steel pipe	Length of steel pipe	Pressure of injection	Rate of injection	Injection material/ number of steel pipe
89 mm	50.8 mm	6 m	0.2~1.5 MPa	8 ℥/min	MFC/5, OPC/5

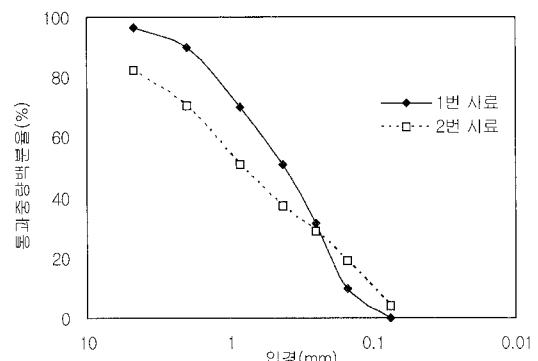
**그림 1.** UAM 현장시험(좌)과 MFC 주입을 위한 강관과 시험위치 배치도(우)**표 2.** 그라우터빌리티 검토 결과

Injection material	Sample Number	N ₁	N ₂	Groutability check	Result
OPC	1	3.7	2.14	$N_1 = \frac{D_{15}}{G_{85}} \geq 15$	N.G.
	2	2.61	1.43		N.G.
MFC	1	11.33	6	$N_2 = \frac{D_{10}}{G_{95}} \geq 8$	N.G.
	2	8	4		N.G.

이 설치되었다. 강관은 400, 500, 600 mm 수평 간격으로 설치하여 이격거리의 영향을 파악하고자 하였으며, 400 mm 간격으로 설치된 지역에는 강관을 2열 설치하여 중첩효과도 조사하였다. 전체적인 시험개요 및 강관의 배치는 아래의 표 1 및 그림 1과 같으며, 마이크로 시멘트 주입 강관 배치와 보통 시멘트 주입 강관배치 모두 동일한 간격이 적용되었다.

2.2 SPT, 입도분석 및 그라우터빌리티 조사

표준관입시험(SPT) 결과, 대상지반 N값의 범위는 12~50으로 나타나 상대밀도는 대부분 중간 이상인 것으로 확인되었다. 또한, 체분석시험을 통한 입도분석을 하였고(그림 2), 그 결과를 바탕으로 그라우터빌리티 조사를 하였다. 침투주입이 가능하려면 Table 2의 N₁과 N₂ 모두 기준값 이상이어야 하나 분석 결과, N₁과 N₂ 모두 기준값에 미달하여 OPC 뿐만 아니라 MFC도 침투주입

**그림 2.** 시험대상지반의 입도분포곡선

이 어려운 것으로 나타났다(표 2).

2.3 육안관찰을 위한 보강지반 굴착

강관 그라우팅 주입이 완료되고 약 세 달 후에 강관의

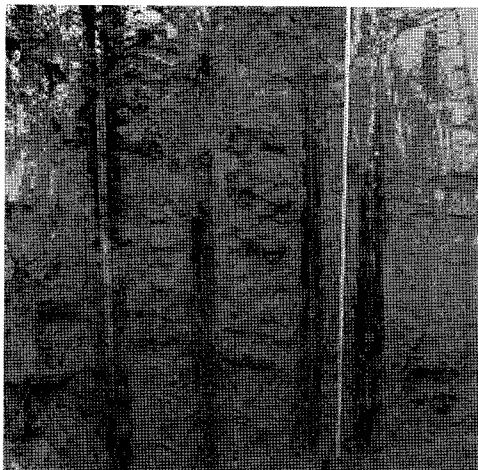


그림 3. UAM 보강지반(MFC 주입)의 주입형태 육안관찰

근입깊이인 6 m까지 기계 및 인력으로 지반을 굴착한 후, 페놀프탈레이 반응시험을 수행하여 강관 그라우팅 보강범위를 파악하였다.

그림 3에서 보듯이, 육안관찰 결과 시멘트 보강은 강관표면의 주입 홀(hole) 부근에서만 이루어진 것으로 확인되었으며, 일부 지반의 약한 면을 따라 할렐주입된 곳도 관찰되기도 하였으나 침투에 의한 시멘트 주입은 전체적으로 불량한 것으로 판단되었다. 지층 확인 결과, 마이크로 시멘트 보강지반과 보통 시멘트 보강지반 모두 대상지반 자체의 물성이 균질하지 않고, 보통 시멘트 주입지반의 원지반 조건이 보다 좋은 것으로 확인되어 주입재 종류에 따른 보강효과 파악은 어려웠다.

2.4 공내재하시험

공내재하시험은 그림 1에 표시된 바와 같이 원지반과 강관주변지반에서 수행되었다. 원지반에서의 결과는 12.5~51.5 MPa(변형계수), 40.0~69.5 MPa(탄성계수)로 나타났고, 강관주변지반에서는 18.5~38.0 MPa(변형계수), 41.0~56.0 MPa(탄성계수)로 나타났다.

공내재하시험 결과로부터 얻어진 원지반과 강관주변지반의 변형계수 및 탄성계수는 깊이나 위치에 따른 일정한 경향이 나타나지 않고 있는데, 이는 공 위치에 따라 원지반의 물성 자체가 균질하지 않았고, 보강효과 또한 미미하기 때문인 것으로 판단된다.

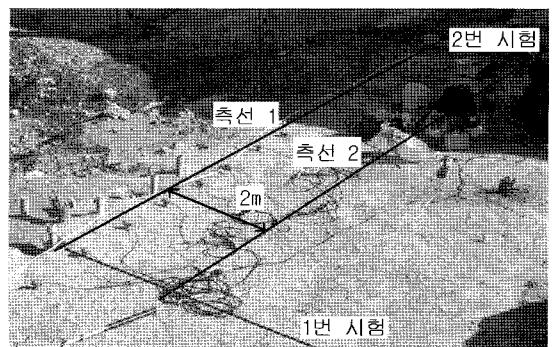


그림 4. HWAW 시험의 측선

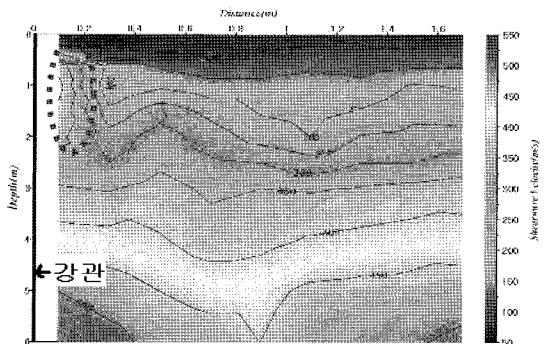


그림 5. 1번 시험의 전단파 속도

2.5 탄성파시험

강관 그라우팅으로 보강된 지반의 전단파 속도를 도출하여 지반보강 효과를 파악하기 위하여 표면파시험인 HWAW(harmonic wavelet analysis of wave) 기법을 사용하여 탄성파시험을 수행하였다. 시험은 주입공으로부터의 이격거리의 영향을 조사하기 위하여, 강관의 설치방향에 수직인 측선에서 수행된 1번 시험과(이격거리 0.1~1.7 m, 지오픈 설치간격 20 cm), 강관과 평행한 두 측선에서 수행된 2번 시험(지오픈 설치간격 1 m)의 두 가지 시험이 수행되었다. 2번 시험은 이격거리 0 m인 측선 1과 이격거리 2 m인 측선 2에서 두 번 수행되었다(그림 4).

1번 시험으로부터 얻어진 전단파속도 주상도가 그림 5에 나타나 있다. 비교적 지표면에 가까운 심도(G.L. -0.5~2 m)의 강관근입 주위지반(이격거리 30 cm 부근)에서의 전단파속도(원으로 표시된 부분)가 같은 심도의 다른 이격거리에서 얻어진 전단파속도보다 큰 값(약 400 m/sec)으로 나타나, 강관그라우팅의 영향범위는 반

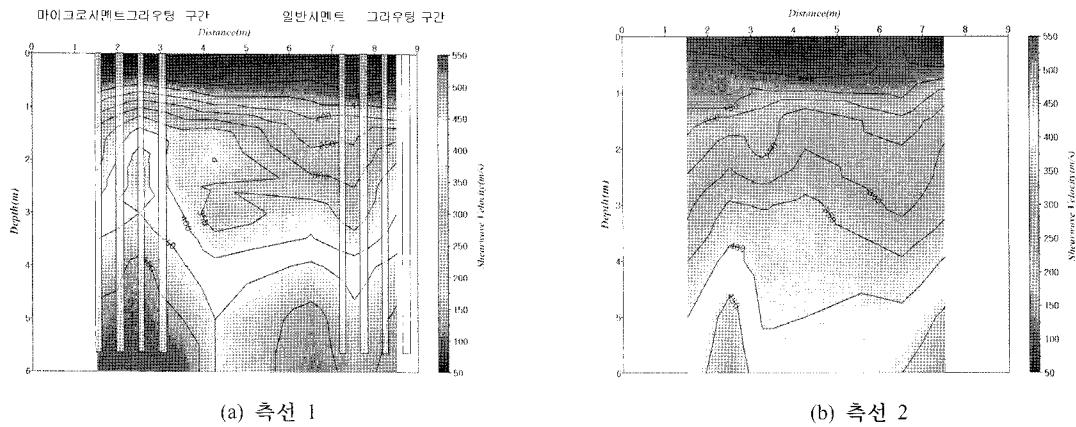


그림 6. 2번 시험의 전단파 속도

경 30 cm 정도인 것으로 판단된다. 하지만 지반의 불균질성에 의한, 즉 강관근입 지반의 원지반 물성이 다른 지역의 원지반 물성보다 커기 때문에 나타난 결과일 가능성이 배제할 수 없다.

2번 시험의 측선 1에서의 전단파 속도는 마이크로 시멘트 보강지반에서의 전단파속도가 보통 시멘트 보강지반에서의 전단파속도보다 큰 것으로 나왔으며(그림 6(a)), 원지반에서 수행한 측선 2에서는 심도별로 비슷한 전단파속도가 얻어졌다(그림 6(b)). 측선 1과 측선 2에서 동일한 심도의 전단파속도 결과를 비교한 결과, 측선 1에서의 전단파속도가 일부 구간에서 큰 것으로 나타나긴 하였으나 원지반 자체의 위치별 물성 차이가 고려되지 않았기 때문에 보강에 의한 결과라고 단언하기 어렵다.

2.6 삼축압축시험

각기 다른 위치와 심도의 원지반에서 채취한 11개 시료에 대하여 삼축압축시험(\overline{CU})을 수행한 결과, 원지반의 점착력은 약 0.003~0.03 MPa의 범위로 나타났으며, 마찰각은 $18^\circ\sim32^\circ$ 로 얻어졌다. 시험결과에서 보듯이 원지반의 물성은 시료채취 장소 및 심도에 따라 비교적 넓은 범위에 걸쳐 있어 대상지반의 낮은 균질성을 말해주며, 이는 앞에서 설명한 공내재하시험이나 탄성파시험 결과를 갖고 강관 그라우팅 보강의 영향을 제대로 판단하는 데에 어려움이 있다는 것을 뒷받침해주고 있다. 침투주입이 거의 이루어지지 않은 상황에서 시멘트 보강이 이루어진 시료의 채취는 불가능하였기 때문에 그라우트

가 주입된 흙 시료에 대한 삼축시험은 수행할 수 없었다.

2.7 시험결과 요약

UAM 현장시험 후, 육안관찰, 현장시험(공내재하시험 및 탄성파시험) 및 실내삼축압축시험을 실시한 결과는 다음과 같다. 육안관찰 결과, 시멘트 구근은 강관내부와 천공경 내부에서만 형성되었으며, 침투에 의한 시멘트 주입은 이루어지지 않은 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 강관 그라우팅에 의한 보강효과가 뚜렷이 나타나지 않은 현장시험 및 실내시험 결과로 다시 확인되었다. 따라서 UAM 보강부분은 일반적인 풍화잔류토의 경우에 강관과 천공경내의 시멘트 구근이 구조체로 작용하는 것으로 해석하여야 하며, 침투주입에 의한 지반물성 증가는 고려하지 않는 것이 타당하다고 판단된다.

3. UAM의 정량적 2차원 수치해석 기법

3.1 수치해석기법의 원리

터널 설계를 위한 내공변위제어법(CCM)의 기본원리 (Carranza-Torres and Fairhurst, 2000)를 도입하여, 그림 7에 나타낸 바와 같이, 무지보상태, UAM이 빔요소로 입력된 상태, UAM과 속크리트가 고려되는 상태의 2차원 축대칭해석을 실시하고, 무지보상태의 평면변형률 조건 해석에서의 굴착된 터널 내에 내압이 초기응력 상태에서부터 점차 감소하여 0이 되는 상태의 해석을 실시하여 지반반응곡선(ground reaction curve; GRC)

을 구한다. 축대칭 해석에서 막장면이 해석단면에 도달한 시점, 연성 솗크리트가 경성 솗크리트로 변화되는 시점, 변위가 수렴한 시점의 해석단면에서의 각각의 내공변위를 구한다. 각각의 내공변위에 해당하는 내압을 GRC로부터 구하여 초기응력으로 나누면 무지보 상태에서 막장의 하중분담률을 얻는다. 같은 방법으로 UAM만 설치되었을 경우와 UAM과 속크리트가 조합되어 설치되는 경우의 각 시점의 변위에 해당하는 내압을 구하여 초기응력으로 나누면 각 시점의 하중분담률을 구할 수 있다.

이 방법을 그림 8의 (a)의 그래프로 설명하였다. 평면

변형률 조건에서 구한 GRC를 내공변위대 지보압력으로 나타내고, 그림 8 (b)의 축대칭해석에서 구한 LDP (Longitudinal Displacement Profile)를 내공변위대 막장위치로 동시에 표현하였다. 무지보상태에서 최종 굴착시 변위에 해당하는 지보압력을 0이고, UAM이 적용된 상태의 최종 굴착시 변위에 해당하는 지보압력을 GRC에서 구할 수 있다. 같은 방법으로 UAM과 속크리트가 동시에 설치되는 경우의 최종지보압력을 구할 수 있다. 연성속크리트가 타설되는 시점은 해석단면에서 1막장 전진한 후 해석단면에 타설되므로 1막장 전진한 상태의 UAM이 설치된 경우의 변위에 해당하는 지보압력을 구

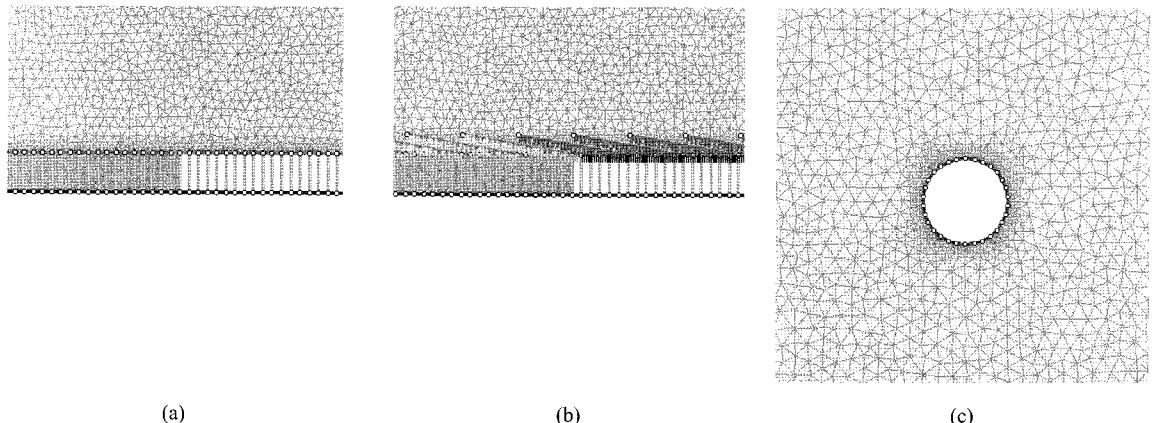


그림 7. (a) 무지보 축대칭모델(1 m 굴착단계), (b) UAM과 속크리트로 보강된 축대칭모델, (c) 2차원 평면변형률 모델

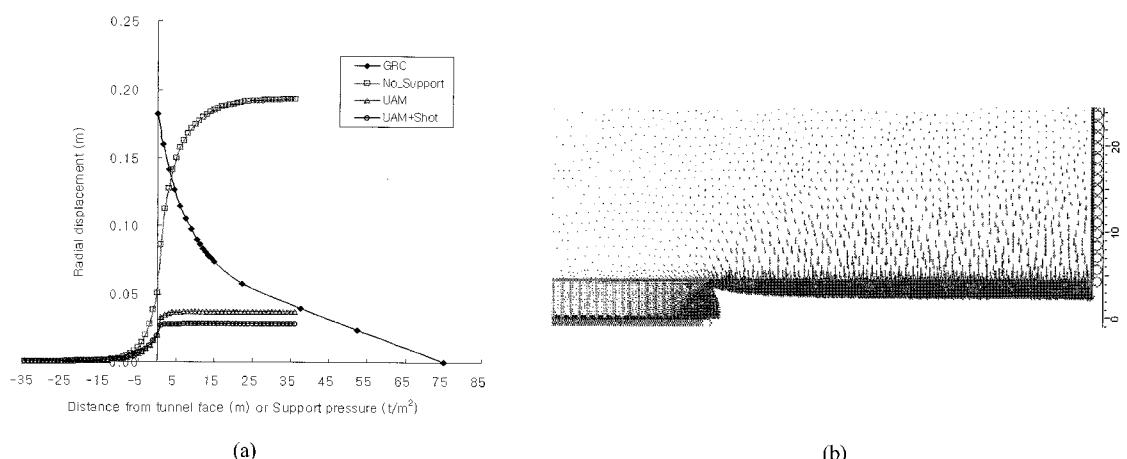


그림 8. (a) 지반반응곡선(평면변형률 해석) ‘변위-지보압력’ 과 이에 상응하는 종단변위곡선(축대칭 해석) ‘변위 - 막장거리’,
(b) 터널 내공변위 계산에 사용된 축대칭해석 모델

한다. 경성숏크리트가 설치되는 시점은 숏크리트의 시간경과에 따른 강도증가가 이루어진 적절한 시점의 막장위치에 해당하는 단계에서의 변위로 지보압력을 구한다. 최종적으로 막장이 영향범위 밖까지 멀리 굴진된 경우의 지보압력은 앞에서 언급한 최종지보압력과 같다.

막장위치에 따른 각 단계에서의 UAM의 하중분담률을 알면, UAM의 보강부위를 등가환산물성을 적용하지 않고, 원지반의 터널에 UAM이 설치된 부분($120^\circ \sim 180^\circ$)에 대하여 UAM이 고려된 하중분담률을 적용하고 나머지 부분에 대하여는 일반 하중분담률을 적용하여 해석하면 정량적인 해석이 가능하다. 단, 막장이 해석단면에 도달한 시점의 하중분담률에는, 숏크리트가 막장후방(본 해석에서는 1 m)에 설치되어 해석막장에 도달하기 전에 발생하는 초기변위가 이미 감소된 상태이므로 UAM과 숏크리트가 모두 고려된 하중 분담률을 적용하여야 하며, 연성 숏크리트와 경성 숏크리트가 설치되는 단계는 평면변형률 조건 해석에서 실제로 숏크리트가 적용되므로 UAM만 설치된 경우의 하중분담률을 적용하여야 한다. 이러한 하중분담률을 적용하면 UAM 보강면에는 최종단계에서도 지보압이 남아있게 된다. 이 새로운 해석법으로부터, 축대칭 해석에서 UAM에 작용하는 응력과 막장 굴진시 발생하는 모멘트 변화에 대한 검토가 가능하며, 평면변형률 조건의 해석으로부터는 막장과 숏크리트의 연, 경성 시점에 해당하는 지보재에 발생하는 응력을 계산할 수 있다. 따라서 UAM의 허용휨응력으로부터 UAM의 횡방향 간격 및 제원, 종방향 중침길이의 설계가 가능하며, 기존의 2차원 해석 보

다는 좀 더 현실에 가까운 변위 해석과 지보재 해석이 가능하다.

3.2 해석모델 및 조건

수치해석에는 UAM이 적용된 터널에 대하여 상, 하반분할 굴착의 경우에 대하여 2차원 유한요소 해석 프로그램인 Phase2를 이용하여 축대칭 해석과 평면변형률 조건 해석을 수행하였다. 이 해석은 하반 굴착이 상반 막장으로 상당히 후방에 위치하여 굴착영향을 미치지 않는 터널의 경우를 전제로 하였다. 축대칭 해석에서 지반은 Mohr-Coulomb 탄소성모델을 사용하였으며, UAM은 강관파이프 내부와 외부에서 천공경까지의 시멘트구근과 강관의 등가환산물성을 적용한 탄성 범요소를 사용하였다. CCM의 기본 개념은 원통형 터널의 주변에 일정한 초기등분포 응력이 작용한다는 조건이므로 축대칭해석과 횡단면 해석모두 일정 응력조건(constant field stress)을 적용하였다. 일정응력은 해석대상 터널의 천단부의 초기 연직응력과 동일한 수준으로 적용하면 중력장에 있는 실제 터널의 응력이 모사된다.

해석에 적용한 터널의 제원은 폭 12 m 높이 9 m의 터널로서 상부 반단면을 등가원형단면으로 환산한 경우의 직경은 8.48 m이다. 그림 9에 나타낸 바와 같이 축대칭 해석에서의 경계조건은 대칭회전축과 굴착시작부분의 경계면에는 툴러 경계조건을 부여하고 그 외의 부분에는 모든 방향의 변위를 구속하는 조건을 부여하였다. 해석 반경은 40 m, 축방향 경계는 80 m이며, 1 stage에 1 m씩 굴착하여 총 72 stage를 굴착하는 것으로 하였다.

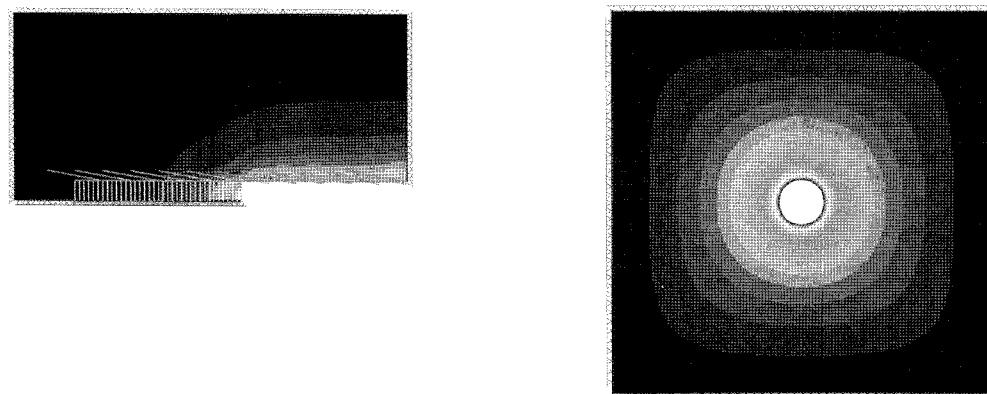


그림 9. UAM 해석을 위한 축대칭 모델(좌) GRC를 얻기 위한 횡단면 평면변형률 모델(우)

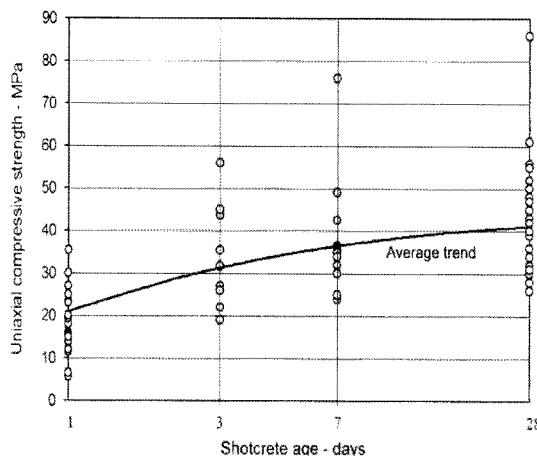


그림 10. 세계의 터널에서 측정된 솗크리트의 재령에 따른 압축강도(Melbye and Garshol, 2000)

횡단면 해석에서의 경계조건은 모든 경계면에서 모든 변위를 구속하는 조건을 적용하여 두 해석조건이 동일한 조건을 이루도록 하였다. 해석 경계는 터널 중심으로부터 좌, 우, 상, 하 각각 40 m이다.

UAM의 하중분담률 및 거동을 파악하기 위하여 길이 12 m이며, 직경 60.5 mm와 두께 3.2 mm인 소구경 강관과 직경 114 mm와 두께 5.6 mm인 대구경 강관이 터널 천단을 기준으로 10° 상향으로 설치되며, 횡단면상으로 50 cm 간격으로 배열되고 터널 종방향으로 6 m 간격으로 중첩되게 직경 8.48 m의 등가원형터널에 설치하였다. UAM이 설치되고 솗크리트가 설치되는 일반적인 경우에 대하여 해석단계는 UAM 적용 및 1막장(1m) 굴착 → 연성 솗크리트 설치(막장으로부터 1 m 후방) → 2막장 굴착 → 경성 솗크리트 설치(막장으로부터 3m 후방) → 3막장 굴착(시작점에서 6 m 전방) 및 UAM 설치의 과정이 반복된다. 경성 솗크리트를 막장으로부터 3 m 후방에 설치한 것은 그림 10에 나타낸 바와 같이 솗크리트의 재령에 따른 강도가 3일 정도에서 최소 약 20 MPa에 도달하기 때문에, 일반적인 토사 터널이나 풍화암 터널에서 1일에 1막장(1 m)을 굴진하므로 3막장 후방에 설치되는 것으로 하였다. 굴착 시작점으로부터 36 m 전방 지점을 해석단면으로 선정하여 72 m까지 굴착되어 해석구간의 막장거리(x)/터널직경(D)의 비율은 환산하면 -4.25D~+4.25D 까지의 굴착에 해당한다.

3.3 연구내용

UAM의 현장시험에서 조사된 바와 같이 조립질의 충적층을 제외하고는 국내의 풍화잔류토는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하여 주입할 경우 침투주입 보다는 할렐 주입에 의해 주입되므로 강관 보강부를 강관과 천공홀 내의 시멘트 구근을 하나의 복합체로 간주하여 구조부재로 보는 것이 타당할 것이다. 이러한 경우 복합체의 등가 탄성계수와 등가 단면이차모멘트를 각 부재의 유효면적과 탄성계수를 이용하여 식 (1)에서 식 (2)를 이용하여 구하였다.

$$E_t = \frac{A_g E_g + A_s E_s}{A_t} \quad (1)$$

$$I_t = \frac{E_g I_g + E_s I_s}{A_t} \quad (2)$$

여기서, A_t 는 천공경의 단면적이고, A_g 는 주입재 구근의 단면적으로 A_t 에서 강관의 단면적을 뺀 값이다. E_g 는 주입재 구근의 탄성계수이며, E_s 는 강관의 탄성계수이다. I_g 는 주입재의 단면 2차모멘트이고, I_s 는 강관의 단면이차모멘트이다. 시멘트구근의 탄성계수는 식 (3)에 의하여 계산하였다.

$$E_g = \phi \times 15000 \times \sqrt{q_t} \quad (3)$$

여기서, ϕ 는 재령 3일 이내일 경우 0.73이며, 재령 5일 이상일 경우에는 1이다. 본 해석에서는 UAM 천공 및 그라우팅까지 2일~3일, 1일 1 m 굴진을 고려하면 해석 단면에 도달하기 전에 설치되어 해석단면 전방에 존재하는 UAM은 최소 8일 경과한 상태이며, 현 막장에서 UAM을 설치하고 굴착하면 기존 UAM의 물성과 현재 설치한 3일 정도 양생된 상태이므로 중첩구간의 UAM의 평균재령을 5일로 결정하였으며, 그라우팅 구근의 압축강도는 회수된 밀크를 모울드에 양생하여 28일 강도를 측정하였으며 평균 8 MPa가 측정되었다.

해석에 사용된 지반의 물성은 풍화토에서 풍화암에 해당하는 3가지의 물성을 사용하였으며, 터널 천단부의 연직응력 3가지, UAM이 없는 상태, UAM(소구경, 대구경의 2가지)만 적용된 상태, 소구경과 대구경 UAM과 동시에 솗크리트가 타설된 경우 대한 축대칭해석을 실

시하였다. 횡단면 해석에서는 지반물성 3가지, 응력조건 1가지에 대한 무지보해석을 실시하여 지반반응곡선을 구하였다. 각 축대칭 해석결과의 변위에 해당하는 지반 반응곡선에서의 내압을 구하여 막장, UAM, 그리고 UAM+Shotcrete의 응력분담비율을 결정하였다. 최종적으로 실제 중력장에서의 지반조건을 모사한 철도터널에 대하여 기존의 UAM 보강부에 등가환산물성을 적용하는 방법과 제안한 방법과의 해석결과를 비교하였다. 축대칭해석에서 지중응력조건은 0.75 MPa 조건을 사용하였으며 중력장에서의 횡단면 해석에서는 터널 천단부에 작용하는 수직응력이 동일하게 되도록 토피고를 도입하였다.

4. 수치해석 결과 및 분석

4.1 지반조건별 UAM의 하중분담률 변화

강성이 다른 지반에 UAM이 설치되었을 경우의 UAM의 하중분담효과를 분석하기 위하여 표 3의 A, B, 그리고 C 지반에 대하여 무지보 상태, 소구경 UAM 보강상태, 소구경 UAM+Shotcrete 보강상태, 대구경 UAM 보강상태, 그리고 대구경 UAM+Shotcrete 보강상태에 대한 축대칭해석을 실시하여 구한 종단변형곡선(LDP)을

구하였다. 그림 11, 그림 13, 그리고 그림 15에 지반 A, B, C에 대하여 축대칭해석에서 구한 각각의 LDP를 나타내었다. 횡단면 해석으로부터 지반반응곡선을 구하여 종단변위곡선과 함께 그림 12, 그림 14, 그리고 그림 16에 나타내었다. 지반이 불량한 경우일수록 무지보 상태에서의 변위가 크게 나타났으며, UAM을 보강하였을 때 변위 감감효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 모든 경우에서 UAM과 속크리트가 동시에 타설되는 경우가 변위가 좀 더 감소하는 것으로 나타났다. 대구경 UAM을 적용한 경우에 변위감소효과는 상당히 큰 것으로 나타났다. 모든 조건에서 UAM이 적용되면 막장이 해석단면을 통과한 후 변위가 빨리 수렴하는 경향을 나타낸다.

그림 12, 14, 16에서 소구경 UAM과 대구경 UAM이 보강된 경우의 막장, 연성 속크리트 타설 시점(막장통과 1 m), 경성 속크리트 타설 시점(막장통과 3 m)의 응력분담률과 응력분배율을 구하여 표 5에 나타내었다. 이 표에서 “속크리트포함”과 “속크리트 불포함”은 축대칭해석에서 하중분담률을 구할 때 막장의 위치가 해석단면에 도달하였을 때에 속크리트는 막장 후방에 설치되어 변위에 영향을 미치고 있으나, 평면변형률 조건 해석에서는 속크리트가 구조부재로 도입되기 전 이므로 속

표 3. 축대칭해석과 횡단면해석에 사용된 지반의 물성

		Deformation modulus (MPa)	Poisson's ratio	Cohesion (MPa)	Friction angle (°)	*Density (tf/m ³)
Residual soil	A	50	0.33	0.05	33	1.9
Weathered rock	B	100	0.33	0.1	35	2.0
	C	200	0.3	0.1	35	2.0
*Soft rock I		490	0.3	0.15	35	2.2
*Soft rock II		1000	0.24	0.2	40	2.6
Shotcrete	Soft	5000	0.2	-	-	-
	Hard	15000	0.2	-	-	-

*모든 지반의 단위중량과 연암의 물성은 횡단면해석의 중력장 조건 해석에만 사용됨

표 4. 축대칭 해석에 사용된 UAM과 속크리트의 역학적 물성치

		Deformation modulus (MPa)	Poisson's ratio	Moment of inertia (m ⁴)	Thickness (m)
UAM	dia. = 60.5	38266	0.2	4.58e ⁻⁶	-
	dia. = 114	77242	0.2	1.42e ⁻⁵	-
Shotcrete	Soft	5000	0.2	3.41e ⁻⁴	0.16
	Hard	10000	0.2		0.16

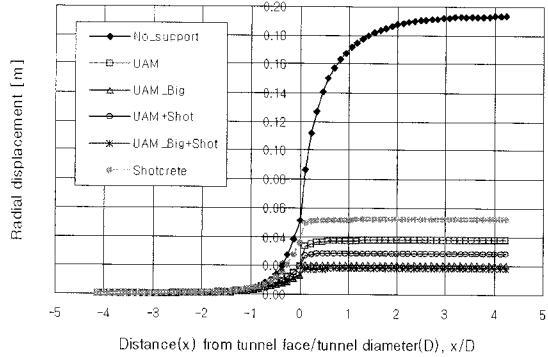


그림 11. 지반조건 A에서의 보강상태별 LDP

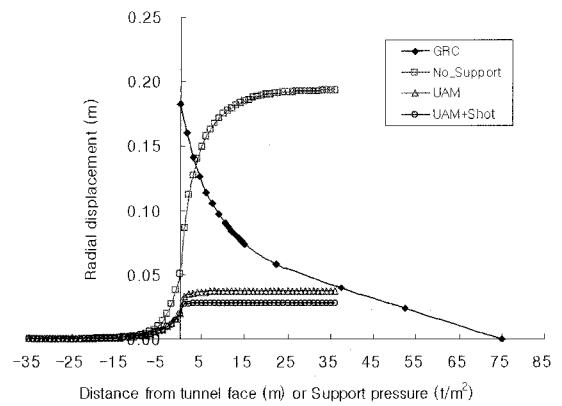


그림 12. 지반조건 A에서의 GRC와 LDP

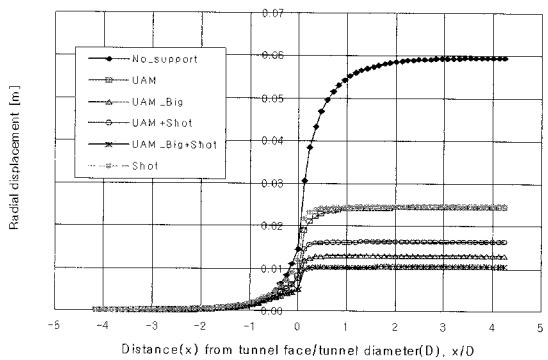


그림 13. 지반조건 B에서의 보강상태별 LDP

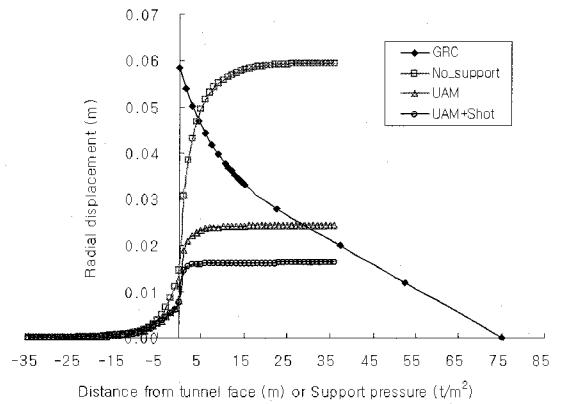


그림 14. 지반조건 B에서의 GRC와 LDP

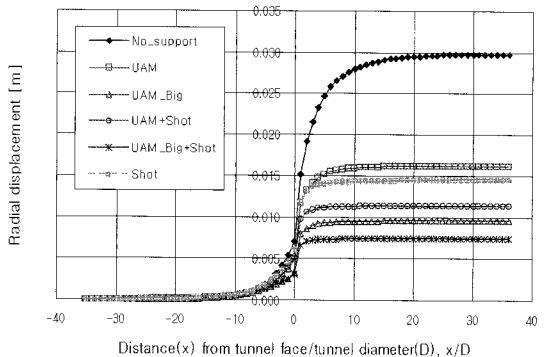


그림 15. 지반조건 C에서의 보강상태별 LDP

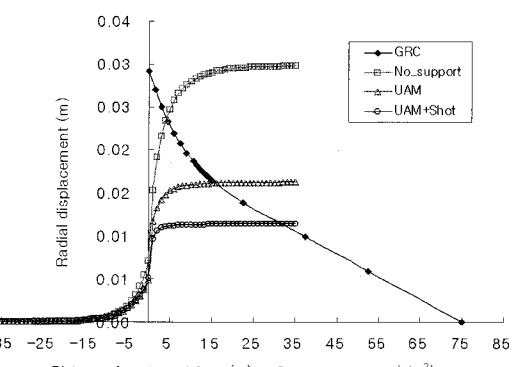


그림 16. 지반조건 C에서의 GRC와 LDP

크리트가 포함된 응력분배율을 적용하여야 하며, 막장이 해석단면을 통과하여 연성, 경성 솗크리트가 설치되는 단계에는 평면변형률 조건 해석에서 솗크리트가 구

조부재로서 도입되므로 솗크리트가 포함되지 않은 응력분배율을 적용하여야 한다. 지반이 불량 할수록 무지보인 경우에 막장의 응력분담률은 작게 나타나며, UAM

표 5. 지보압력 대 초기응력의 비(축대칭해석 결과)

조건 지반조건		막장위치	무보강시 응력분담률(%)	소구경 UAM 보강시 응력분담률(%)	대구경 UAM 보강시 응력분담률(%)
A	숏크리트 포함	해석단면 도달(0 m)	55(45)	76(24)	84(16)
	숏크리트 불포함	해석단면에서 1 m 전방 (Soft shotcrete 타설)	15(40)	58(18)	75(9)
	숏크리트 불포함	해석단면에서 3 m 전방 (Hard shotcrete 타설)	0(15)	53(5)	74(1)
B	숏크리트 포함	해석단면 도달(0 m)	71(29)	82(18)	88(12)
	숏크리트 불포함	해석 단면에서 1 m 전방 (Soft shotcrete 타설)	24(47)	52(30)	71(11)
	숏크리트 불포함	해석단면에서 3 m 전방 (Hard shotcrete 타설)	0(24)	38(14)	67(4)
C	숏크리트 포함	해석단면 도달(0 m)	70(30)	75(25)	85(15)
	숏크리트 불포함	해석단면에서 1 m 전방 (Soft shotcrete 타설)	25(45)	40(35)	60(25)
	숏크리트 불포함	해석단면에서 3 m 전방 (Hard shotcrete 타설)	0(25)	21(19)	51(9)

* ()안의 숫자는 응력분배율을 나타냄

이 보강된 경우에 굴착이 완료된 시점의 최종적인 UAM의 응력분담률이 커지는 것을 알 수 있다. 즉 지반이 불량 할수록 UAM의 변위억제효과가 크게 나타난다.

4.2 UAM 부재력 분석

축대칭해석으로부터 UAM 축에 직각으로 작용하는 수직응력과 UAM의 반경방향 변위, UAM에 발생하는 모멘트를 구할 수 있다. 그림 17에 지반조건 A인 경우의 UAM에 작용하는 수직응력(UAM축의 법선방향)을 나타내었다. UAM을 설치하고 1 m씩 굴착해 나감에 따라 작용하는 응력의 크기와 변화의 패턴을 볼 수 있다. 1 m 굴착시에는 강관 시작부에 가장 큰 응력이 발생하고, 막장 전방에도 응력이 증가한다. 굴착이 진행될수록 작용응력의 정점은 강관 시작부와 막장 사이에서 발생하며, 6 m 굴진되어 새로운 UAM이 설치된 상태에서는 굴착이 이루어지면 중첩된 부위에 작용하는 응력은 초반 6 m 지점까지의 응력보다 상당히 작다. 그림 18에는 굴착에 따른 UAM의 터널 반경방향의 변위를 도시하였다. 1 m 굴착되었을 때 UAM의 시작부에는 강지보와

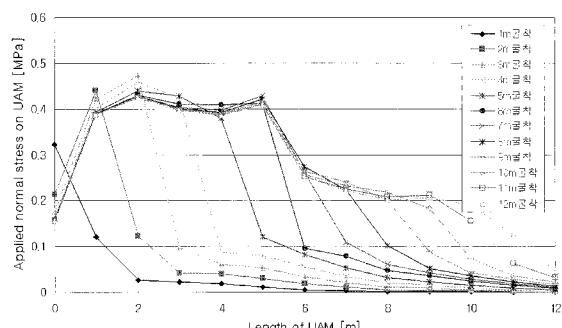


그림 17. 막장 전진에 의해 UAM에 작용한 수직응력

숏크리트로 지지되어 있지 않은 상태이므로 시점부에서 최대 처짐이 발생한다. 그러나 막장이 2 m 이상 전진되었을 때에는 UAM의 시작점에 강관과 숏크리트 지지가 이루어지는 상태이므로 최대변위는 UAM의 시작점과 막장면 사이에서 발생한다. 이러한 작용응력과 처짐에 따라 UAM에 발생하는 힘모멘트를 그림 19에 도시하였다. UAM 설치후 첫 번째 굴착에서 가장 큰 힘모멘트가 발생하며, 6 m 전진한 상태에서의 최대힘모멘트는 막장

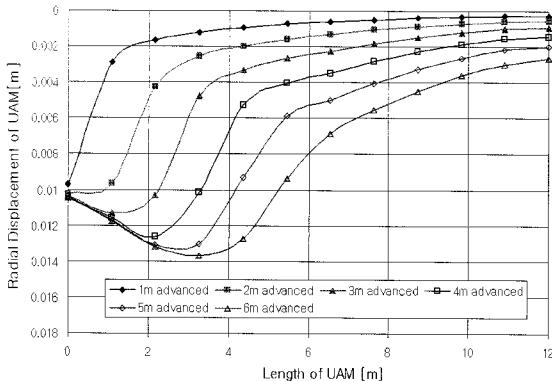


그림 18. 막장전진에 의한 UAM의 침침

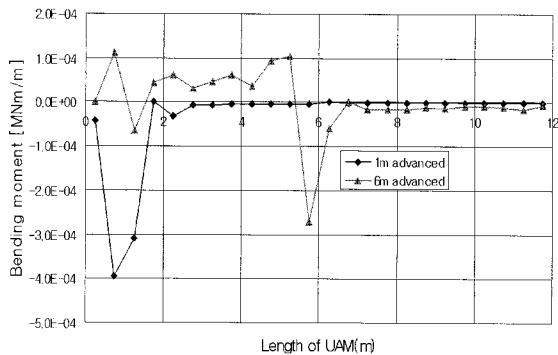


그림 19. 막장전진에 의한 UAM의 흡모멘트

면 부근에서 발생하나 1 m 전진했을 때의 모멘트보다는 작다.

4.3 기존 해석법과의 비교

철도터널에 적용되는 단면 형상에 대하여(그림 20) 터널 상부 반단면 위쪽의 지반이 표 2의 지반조건 A, B, C로 변하고 그 하부는 soft rock I, II가 순차적으로 존재하는 지반에 대하여 UAM의 하중분담률을 적용한 새로운 해석과 기존의 환산물성을 사용하는 해석결과를 비

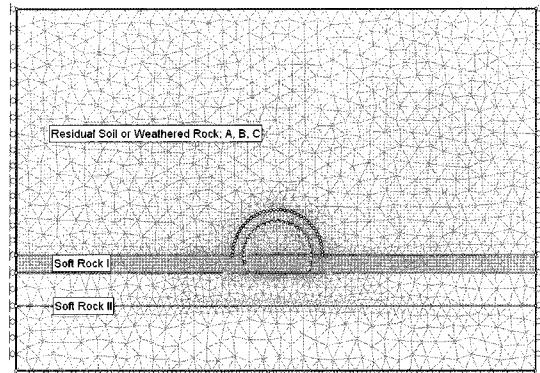


그림 20. 2 비교를 위한 2차원 유한요소모델

교하였다. 측압조건은 $K_0=1.0$ 인 조건에 대하여 수행하였다. 기존 해석방법의 적용시에 UAM 보강부 등가환산물성치는 지반, 소구경 강관, 시멘트구근의 면적비를 이용하여 등가탄성계수를 구하였다(표 6). 그림 21의 A 지반에 대한 두 해석의 변위를 비교하면 새로 제안된 방법으로 해석한 경우가 기존 환산물성을 사용하는 방법보다 변위가 작게 발생한다. 이것은 기존 환산물성을 사용하는 방법에서는 UAM의 종방향 범으로서의 지지역할을 고려하지 못하고 단순히 횡단면상의 환산물성만을 고려하기 때문이다. 새로 제안된 방법은 CCM의 기본 원리에 의해 UAM의 종방향 범지지효과를 응력분담률로서 고려하기 때문에 좀 더 현실적인 해석이라고 할 수 있다. 지반조건에 대한 변위비교결과를 표 7에 나타내었다. 전반적으로 지반이 불량한 경우에 두해석의 차이가 커지는데, 이는 새로운 방법에서는 지반이 불량할 수록 축대칭해석 결과에서와 같이 UAM의 하중 지지효과가 크게 나타나는 것을 반영하기 있기 때문이다. 기존 해석에서는 등가환산물성으로 적용된 지반이 소성상태로 가기 때문에 변위가 크게 발생한다.

표 6. UAM으로 보강된 지반의 등가환산물성치(C.T.C=50 cm, 2열 중첩)

Soil type \ Division	Deformation modulus (MPa)	Cohesion (MPa)	Friction angle (°)	Density (tf/m ³)
A	438.19	0.097	33	1.9
B	487.30	0.146	35	2
C	585.52	0.146	35	2

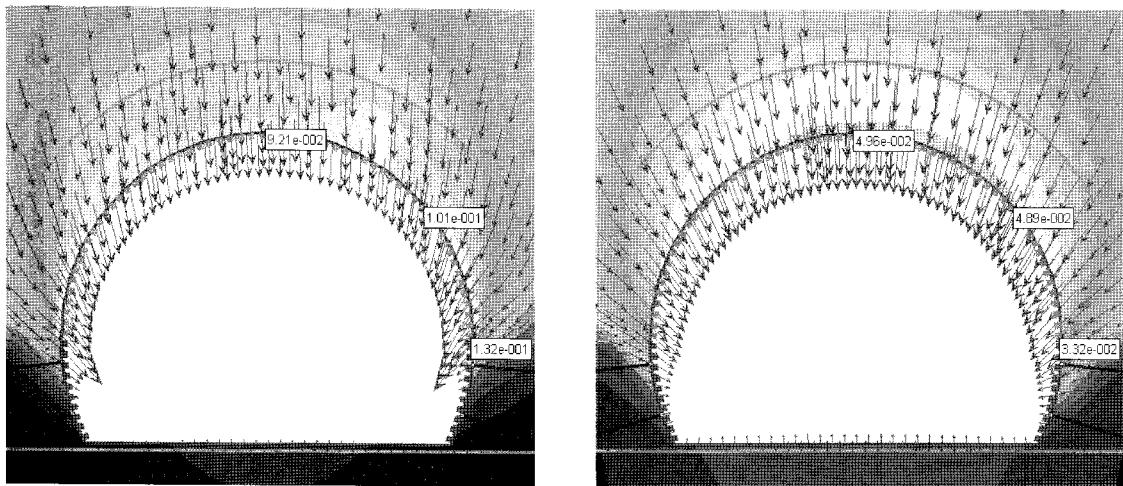


그림 21. A 지반에서의 해석법에 의한 변위비교

표 7. 터널 천단, 어깨, SL에서의 해석법에 의한 변위비교

Soil type	Division		crown (cm)		shoulder (cm)		spring line (cm)	
		New method		Previous method		New method		Previous method
A		4.96		9.21		4.89		10.1
B		2.89		4.05		2.97		4.11
C		2.17		2.58		2.18		2.6
								3.32
								13.2
								2.58
								4.95
								1.93
								3.08

5. 결 론

UAM의 보강효과에 대하여 현장실험을 통해 그라우팅에 의한 지반 보강효과보다는 강관과 시멘트구근의 구조체에 의한 지지효과로 해석하는 것이 바람직하다는 결론을 얻었다. 이에 따라 UAM의 중방향 빔 형성에 의해 이완하중을 지지하는 효과를 2차원적으로 해석하는 방법으로서 CCM의 원리를 응용한 축대칭해석과 평면변형률 해석의 조합으로 해석할 수 있는 방법을 제안하였다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 현장실험 결과 UAM 설치시 압력주입에 의한 지반 내에서의 주입재의 이동은 주로 지반활렬에 의해 맥상을 이루나 물성증가를 야기할 정도의 조밀한 맥상이 아니므로 물성 증가현상은 미미한 수준으로 나타났다.

- 무지보상태, 콘크리트 설치상태, UAM 설치상태, UAM과 콘크리트를 동시에 설치상태에 대한 축대칭해석과 무지보상태의 평면변형률 조건 해석으로부터 지보재 및 UAM의 응력분담율을 구하는 방법과 실제 터널해석에서 이 응력분담율을 적용하는 방법을 제안하였다.
- 제안된 방법은 기존이 등가환산률성을 사용하는 방법에 비해 변위가 작게 산출되며, 지반이 불량한 경우 그 효과는 더욱 큰 것으로 나타났다. 이는 UAM의 중방향 빔 지지효과가 응력분담률을 내에 반영되기 때문이며, 기존의 해석방법은 이러한 효과가 반영되지 않기 때문에 변위가 크게 발생하는 것으로 해석되었다.

제안된 해석 방법을 실무에 적용하기 위해서는 초기 응력비 K_0 가 1이 아닌 경우와, UAM 중첩길이 변화, 다

양한 지반 조건에 대한 추가적인 연구 및 3차원 해석과의 비교가 필요할 것이다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술 평가원에서 위탁시행 한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술C01)에 의하여 연구비가 지원되었습 니다.

참고문헌

1. 김선흥, 문현구 (2002), “Umbrella arch 공법의 보강효과 및 천단침하량 예측에 관한 연구”, 터널과 지하공간, Vol. 39, No. 3, pp. 259-267.
2. 김창용, 배규진, 문현구, 최용기 (1998), “Umbrella Arch 공법이 적용된 터널의 3차원 유한요소 해석에 관한 연구”, 터널과 지하공간, Vol. 8, No. 3, pp. 209-225.
3. 박이근, 임종철 (2004), “강관다단 그라우팅공법(UAM)의 설계법 제안”, 한국지반공학회논문집, 제 20권 3호 pp. 97-106.
4. 배규진, 김창용, 문홍득, 홍성완 (1997), “Umbrella Arch 공법에 의한 터널 천단부 보강시 주변지반의 거동에 관한 연구”, 터널과 지하공간, Vol. 7, No. 4, pp. 299-309.
5. 장석부, 권승, 김기림, 허도학 (2002), “터널 막장보강을 위한 합리적인 선진보강공법설계기법”, 한국터널공학회지, Vol. 4, No. 3, pp. 6-13.
6. 차민웅, 이승도, 문현구 (2004), “Umbrella Arch 공법이 적용시 강관의 거동에 관한 수치해석적 연구”, 터널과 지하공간, Vol. 14, No. 1, pp. 26-34.
7. 최용기, 김창용, 한명훈, 황찬호 (1997), “연약지반 터널 굴착시의 지반보강사례연구”, 97한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, pp. 133-139.
8. 한국터널공학회 (2007), “터널의 이론과 실무 - 도심지 천층 및 근접터널”.
9. Barisone, G., Pigorini, B. and Pelizza, S. (1982), “Umbrella Arch Method for Tunnelling in Difficult Conditions-Analysis of Italian Cases”, proc. 4th Congress of International Association of Engineering Geology, New Delhi, Vol. 4, pp. 15-27.
10. Carranza-Torres, C. and Fairhurst (2000), “Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses That Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 15, No. 2, pp. 187-213.
11. Melbye, T. and Garshol, K.F. (2000), “Spayed shotcrete for rock support” Master Builders Technologies.
12. Oreste, P., P. and Peila, D. (1998), “A New Theory for Steel Pipe Umbrella Design in Tunnelling”, Proc. of the World Tunnel Cong. 98 on Tunnels and Metropolises, Vol. 2, pp. 1033-1039.
13. Pelizza, S. and Peila, D. (1993), “Soil and Rock Reinforcements in Tunnelling”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 357-372.
14. Pelizza, S., Peila, D. and Oreste, P., P. (1994(a)), “A New Approach for Ground Reinforcing Design in Tunnelling”, Tunnelling and Ground Conditions, Balkemema, pp. 517-522.
15. Pelizza, S., Corona, G., Garasso, F. and Rainieri, R. (1994(b)), “Improvement of Stability Conditions for Half to Full Face Excavation in Difficult Geotechnical Conditions”, Tunnelling and Ground Conditions, Balkemema, pp. 267-271.