

Umbrella arch 공법의 적용에 따른 횡방향 지표침하량 예측에 관한 연구

김선홍¹⁾, 문현구²⁾

A Study on the Prediction of Surface Settlement Applying Umbrella Arch Method to Tunnelling

Seon-Hong Kim and Hyun-Koo Moon

Abstract. Recently, Umbrella Arch Method(UAM) is commonly used in order to enhance the stability of tunnel itself and stabilize the adjacent surface structure. But quantitative estimation of reinforcement effect is needed because UAM is designed and constructed only on the basis of empirical experience. By using 3-dimensional finite element method, parametric study is performed for elastic modulus of ground and overburden, and reinforcement effect is analyzed quantitatively. From the results, surface settlement decreases about 9%~27% in soil tunnel, about 4%~24% in weathered rock tunnel and 4%~17% in soft rock tunnel when applied with UAM. The prediction equation for final surface settlement is suggested through regression analysis and the equation is expressed as exponential function which has variable S_{max} , unknown coefficient i and k .

KeyWords: Umbrella Arch Method, Surface Settlement, Exponential Function, Overburden, Regression Analysis

초 록. 연약 지반에 건설되는 지하철, 철도, 도로 등의 터널은 터널자체의 안정성을 향상시키고 지표침하로 인한 인접구조물의 안정성을 확보하기 위하여 UAM(Umbrella Arch Method)이 많이 적용되고 있다. 그러나 이 공법은 현장 시공사례를 통한 경험적인 방법에 의해 설계와 시공이 이루어지고 있어 체계적인 설계·시공방법과 보강효과를 정량적으로 판단할 수 있는 방안이 요구된다. 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 지반의 탄성계수와 지층두께에 대한 매개변수 연구를 수행하였으며, UAM의 보강효과를 변위에 대해 정량적으로 분석하였다. 그 결과, UAM 적용시 토사지반의 터널은 9%~27%, 풍화암지반의 터널은 4%~24% 그리고 연암지반의 터널은 4%~17%의 지표침하량이 감소하였다. 또한, 지반의 탄성계수와 지층두께에 대해 회귀분석을 실시하여 최대 지표침하량(S_{max})과 미지계수 i , k 로 표현되는 지수함수 형태의 횡방향 지표침하량 예측식을 제안하였다.

핵심어: 강관다단그라우팅공법(UAM), 지표침하량, 지수함수, 지층두께, 회귀분석

1. 서 론

대도시의 인구증가와 교통난, 상·하수도 등의 문제 해결을 위한 사회기반시설의 확충을 위해 지하철, 전력 구, 공동구 등의 터널이 많이 건설되고 있으며, 이러한

터널은 과거와는 달리 용지제한 등으로 인하여 노선이 많은 제약을 받아 지반조건이 불량하거나 지상구조물에 근접되는 등 시공여건이 매우 열악한 지역에 건설되는 경우가 많다. 특히, 연약지반에 건설되는 터널은 터널 자체의 안정성뿐만 아니라 과도한 지표침하로 인해 인접한 지상구조물의 안정성에도 매우 중요한 영향을 미치며, 이 경우 일반적으로 강관다단그라우팅 공법(Umbrella arch method, UAM) 등과 같은 보조 공법을 적용하여 터널의 천단변위 및 지표침하를 제어하게 된다.

¹⁾정회원, 유신코퍼레이션 터널부 이사, 한양대학교 지구환경시스템공학과 박사수료

²⁾정회원, 한양대학교 공과대학 시스템응용공학부 지구환경시스템공학과 교수
접수일: 2002년 9월 17일
심사 완료일: 2002년 12월 23일

터널굴착에 따른 지표침하영역 예측기법에 대한 체계적인 연구는 Peck(1969)에 의해 처음 수행되었다고 볼 수 있다. Peck은 다양한 현장 조건에서 수집한 계측자료를 토대로 지표면의 침하형상은 가우스 정규분포곡선(Gauss normalized probability function)을 따르며, 정규분포곡선의 특성을 이용하여 횡방향 지표침하량을 예측할 수 있는 지수함수식을 제안하였다. 이후, Peck이 제안한 지표침하곡선을 특성화시킬 수 있는 변곡점(inflexion point, i)을 결정하기 위해서 Schmidt (1974), Cording과 Hansmire(1975), Attewell(1981) 그리고 O'Reill와 New(1982)는 계측자료를 토대로, Atkinson과 Potts(1977) 그리고 홍성완 등(1988)은 실내시험 결과로부터 지층두께와 터널직경으로 표현되는 관계식을 제시하였다.

UAM 적용에 대한 연구는 UAM을 적용한 시공사례 및 계측자료를 통해 막장의 안정성 및 지반 거동 특성을 분석한 Pelizza and Pelia(1993), 배규진 등(1997), Harazaki et. al.(1998) 등의 연구와 수치해석을 통해 UAM의 보강효과를 평가한 Pelizza et. al.(1994), 김형탁 등(1995), 김창용(1998) 그리고 김선홍과 문현구(2002) 등의 연구를 들 수 있다.

김창용 등(1998), 배규진 등(1997), 김형탁 등(1995), 그리고 한국건설기술연구원(1998) 등은 터널중심으로부터 이격거리에 따른 지표침하곡선으로 제안한 지수함수식이 높은 상관성을 가지며, 수치해석에 의한 연구결과, UAM 적용시 약 19%의 지표침하경감 효과가 있고 특정 현장에 대한 계측결과에 의하면 최대 48%의 지표침하 경감효과가 있다고 하였다.

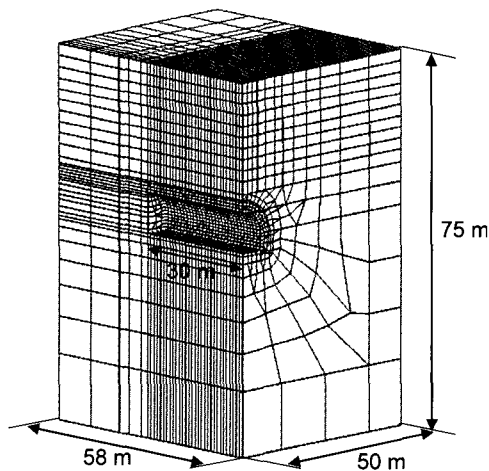


Fig. 1. The 3-dimensional finite element model.

김선홍과 문현구(2002)는 탄성계수와 지층두께에 대한 3차원 수치해석 및 회귀분석을 실시하여 UAM 적용 유·무에 따른 막장면의 천단침하량(S_0)과 수렴후의 최대 천단침하량(S_{max})으로 표현되는 지수함수 형태의 천단침하량 예측식을 제안하였다.

따라서, 본 연구에서는 터널 굴착시 인접한 구조물의 안정성에 많은 영향을 미치는 지표침하를 합리적으로 예측하기 위하여 대상지역의 특성을 고려할 수 있는 예측방안을 모색하고자 한다. 이를 위하여 지반의 탄성계수와 지층두께를 매개변수로 한 3차원 유한요소해석을 수행하여 UAM 적용 유·무에 따른 지표침하량을 분석하고 가우스 정규확률분포 곡선형태의 침하량 예측식의 최대침하량(S_{max}), 변곡점(i), 상수(k)를 탄성계수와 지층두께에 대하여 회귀분석을 실시하여 터널굴착시 지표침하량을 예측할 수 있는 함수식을 제안하고자 한다.

2. 해석모델 및 조건

본 연구에서는 3차원 유한요소 해석 프로그램인 Pentagon-3D를 이용하여 터널 굴착시 적용되는 미니벤치공법의 시공순서를 모델링하였으며, 터널의 환산직경(D)은 약 10 m이다. 터널 천단으로부터의 지층두께를 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, 30 m($0.5D \sim 3.0D$)의 6가지 모델을 설정하였다.

Fig.1은 지층두께 30 m일 경우의 3차원 유한요소망으로 총 절점수는 12528개, 지반을 구성하는 8절점 solid 요소는 11655개 그리고 슛크리트를 모델링한 4절점의 shell 요소는 1201개이며, 록볼트와 강관을 모델링

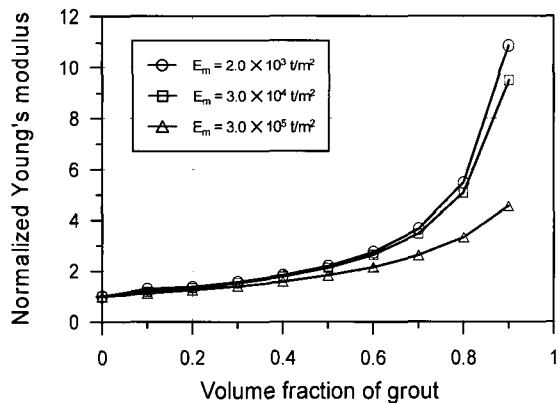


Fig. 2. Normalized Young's modulus of grouted ground with volume fraction of grout.

Table 1. Mechanical properties of the ground and shotcrete

ground type	properties	Young's modulus E (t/m ²)	Poisson's ratio ν	cohesion (t/m ²)	friction angle ϕ (degree)	unit weight (t/m ³)
ground A		2.0×10^3	0.3	1.5	30	1.9
ground B		5.0×10^3	0.3	3	30	2
ground C		1.0×10^4	0.28	5	32	2.1
ground D		3.0×10^4	0.27	7	33	2.2
ground E		5.0×10^4	0.27	10	33	2.2
ground F		1.0×10^5	0.26	20	34	2.4
ground G		3.0×10^5	0.25	30	35	2.5
shotcrete		1.0×10^6	0.2	-	-	2.5

한 truss 요소와 frame 요소는 각각 480개와 120개이다. 요소망은 터널의 단면현상, 지층, 시공순서, 강관 등을 고려하고 상, 하반 굴착경계를 기준으로 지층을 구분하여 모델링하였으며, 굴착에 의한 경계조건의 영향을 고려하여 측면경계는 터널직경의 5배, 하부경계는 터널직경의 4배 이상이 되도록 설정하였다. 보조공법으로는 직경 60.8 mm와 두께 3.0 mm 그리고 길이 12 m의 강관을 터널 천단을 중심으로 횡방향 40 cm, 종방향 6 m의 간격으로 배열하여 터널 갱구부로부터 5열을 설치하고 15°로 설치하였다.

경계조건은 상부지표면은 자유경계조건, 측면과 하부경계는 각각 면에 수직인 방향의 변위를 구속하는 변위경계조건을 적용하였다. 굴착 및 보강과정의 해석순서는 현장의 시공 여건을 고려하여 「UAM 적용 및 굴착 → 연성 슛크리트 → 경성 슛크리트 + 록볼트 → UAM 적용 및 굴착」 순으로 총 35단계를 설정하였으며, 굴진장은 1.0 m, 상반과 하반의 벤치길이는 0.5D로 하였다.

본 연구에서는 강관과 주입재가 삽입된 지반은 복합

체로 가정하였으며, 복합체의 등가물성은 김광진과 문현구(2001)가 발표한 변형률에너지 이론(strain energy theory)에 의해 도출한 횡방향 탄성계수의 연구 결과와 배규진 등(1997) 그리고 이준석(1998) 등의 주입 효과 연구 결과를 참조하여 적용하였다.

변형률에너지 이론에 의해 주입재의 탄성계수와 포아송비를 2.17×10^6 t/m²와 0.2를 적용하였을 경우, 주입재의 체적분율에 따른 강화지반의 등가물성 변화는 Fig. 2와 같다. 주입재의 체적분율이 증가함에 따라 강화지반의 등가물성이 증가하며, 체적분율이 0.4~0.5 정도에서 강화지반은 원지반의 약 2배의 탄성계수를 나타내므로 주입재의 평균적인 주입률(20~50%)과 물성치 증가에 대한 기존 연구결과를 참조하여 강화지반의 탄성계수는 원지반 탄성계수의 2배를 적용하였다.

지반의 거동특성과 보강효과를 파악하기 위하여 사용한 지반물성은 Table 1과 같으며, 지반물성 중에서 A~B는 풍화토(weathered soil), C~E는 풍화암(weathered rock), F~G는 연암(soft rock)에 해당되며, 7가지 물성

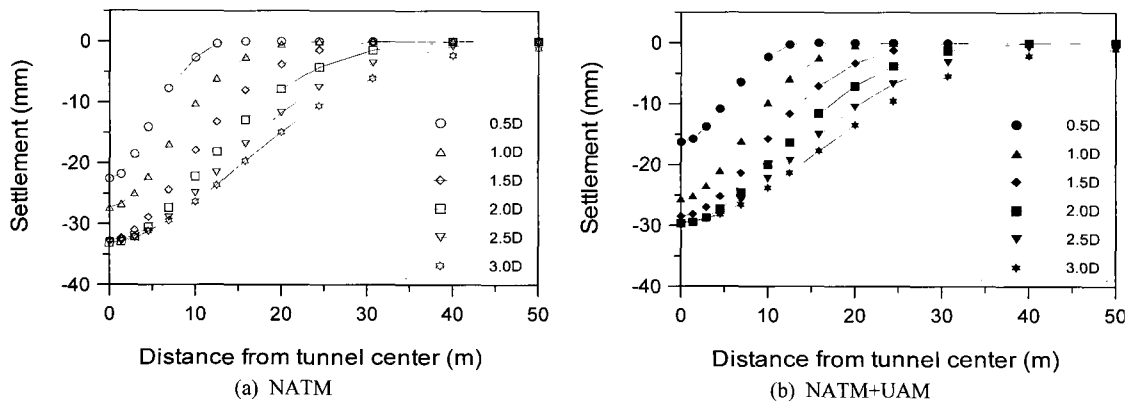


Fig. 3. Surface settlement variation due to tunnelling in ground A.

과 6가지 지층두께 그리고 UAM 적용 유·무를 조합한 총 84가지 경우에 대하여 3차원 전산해석을 수행하였다.

3. 지표침하 분석

본 연구에서는 7가지의 지반물성과 6가지의 지층두께 그리고 UAM 적용 유·무를 조합한 총 84가지 경우에 대하여 3차원 전산해석을 수행하였으며, 인접한 지상구조물의 안정성 향상을 위하여 UAM을 적용한 경우 지반물성과 지층두께에 따른 지표침하 억제에 의한 보강효과를 비교·분석하였다.

지반의 탄성계수가 $2 \times 10^3 \text{ ton/m}^2$ 인 지반 A의 경우, Fig.3과 같이 UAM을 적용하지 않은 경우 최대 지표침하량은 지층두께가 0.5D일 때 22.6 mm이고 지층두께가 3D일 때 32.6 mm 발생하였으며, UAM을 적용한 경우에는 지표침하량이 지층두께가 0.5D의 경우 16.3

mm 및 3D의 경우 29.4 mm가 발생하여 약 10%~28% 감소하였다. 이 경우 지층두께가 증가함에 따라 지표침하 발생 범위가 증가하여 변곡점 i의 위치는 UAM을 적용하지 않은 경우 지층두께가 0.5D일 때 터널 중심으로부터 4.30 m, 지층두께가 3D일 때 터널 중심으로부터 13.7 m이며, UAM을 적용한 경우에는 지층두께가 0.5D일 때 터널 중심으로부터 5.10 m, 지층두께가 3D일 때 터널 중심으로부터 14.2 m로서 침하의 발생범위가 4%~19% 정도 증가하였다. 지반의 탄성계수가 $5 \times 10^3 \text{ ton/m}^2$ 인 지반 B의 경우도 지반 A와 유사한 결과를 나타내며, UAM 적용에 의해 약 9%~24% 정도의 침하량 감소를 나타내었다.

Fig. 4에 나타낸 탄성계수가 $1 \times 10^4 \text{ ton/m}^2$ 인 지반 C는 지층두께가 증가함에 따라 지표침하량이 증가하여 UAM 적용 유·무에 따라 지층두께가 0.5D인 경우 6.2 mm와 4.9 mm, 3D인 경우에는 8.3 mm와 8.0 mm가

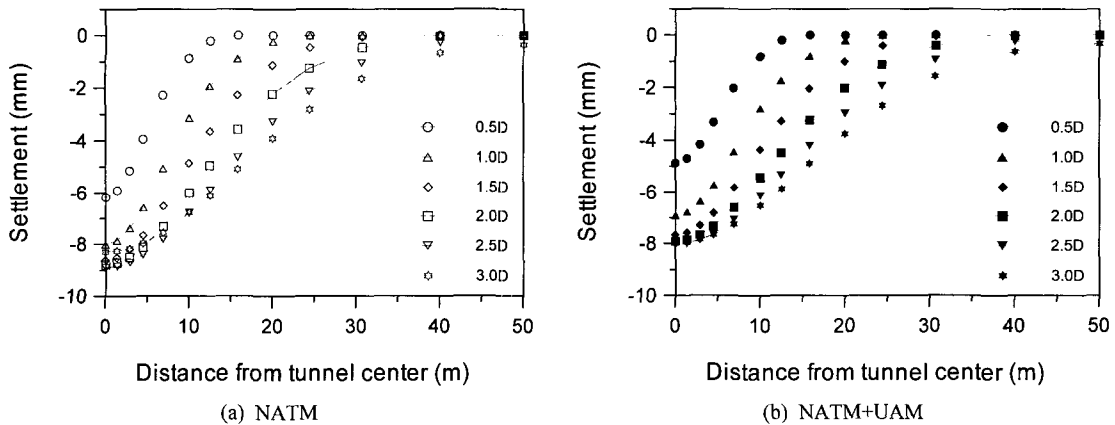


Fig. 4. Surface settlement variation due to tunnelling in ground C.

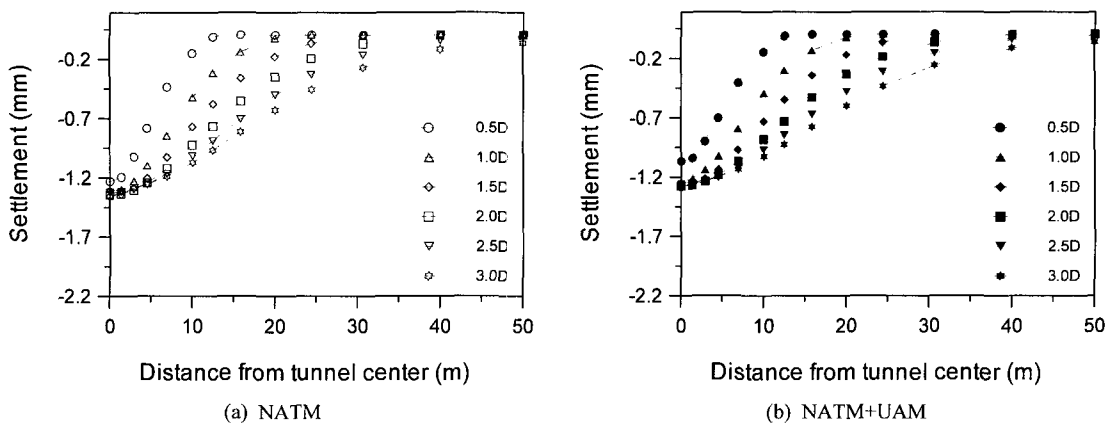


Fig. 5. Surface settlement variation due to tunnelling in ground F.

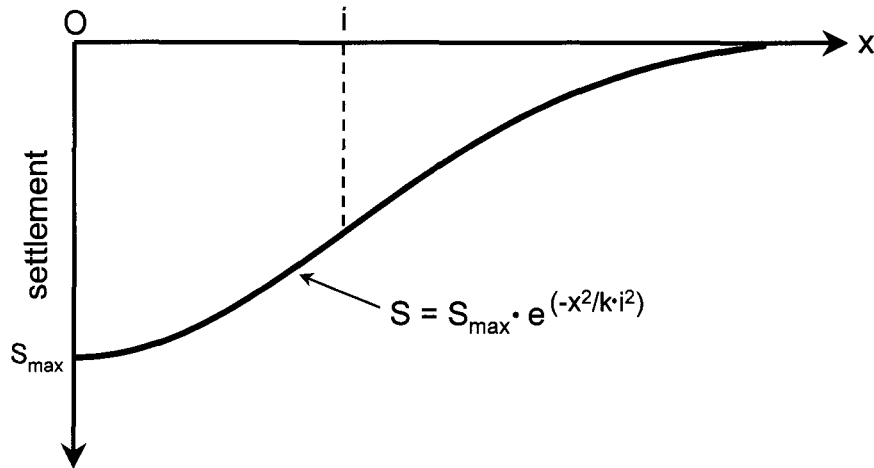


Fig. 6. A generalized form of horizontal surface settlement.

발생하였다. UAM 적용시 지표침하량은 지층두께가 0.5D, 1D, 1.5D, 2D, 2.5D, 3D로 증가할 경우 UAM을 적용하지 않은 경우에 비하여 21%, 14%, 11%, 10%, 9%, 4%정도 감소하여 상재토피가 증가함에 따라 UAM의 적용에 대한 지표침하량 억제 효과가 적게 나타났다. 지반의 탄성계수가 $3 \times 10^4 \text{ ton/m}^2$ 인 지반 D의 경우 UAM 적용에 의해 약 8%~24%의 침하량 감소를 나타내었으며, 지반의 탄성계수가 $5 \times 10^4 \text{ ton/m}^2$ 인 지반 E는 UAM 적용에 의해 약 7%~24%의 변위 감소를 보였다.

Fig. 5에 나타낸 연암의 물성에 해당하는 지반 F의 경우는 지표침하량이 UAM 적용에 의해 약 4%~13% 감소하였으며, 지반 G의 경우는 4%~17% 정도 감소하였다. 지반 F와 지반 G에 시공된 터널의 경우도 지층두께가 증가함에 따라 지표침하량이 증가하고 침하발생 억제를 위한 UAM의 적용효과가 낮아지는 경향을 나타내었다.

따라서 지반의 탄성계수와 지층두께가 작을수록 UAM 적용에 따라 지표침하량이 감소하므로, 지반이 연약하고 지층두께가 작을수록 UAM의 보강효과가 상대적으로 우수하게 나타났다.

4. 지표침하량 예측

터널이 굴착되면 굴착 주변 지반의 지지력이 부분적으로 상실되어 전단변형 및 지하수 유출 그리고 이완영역이 발생하고 터널 주변에 3차원적인 변위영역을 형성시키며, 이러한 영향이 지표면까지 전달되어 지표침하가 발생하게 된다.

터널 굴착에 따른 지표침하 연구는 추계학적 이론방법, 탄소성 이론에 의한 해석방법, 물리적 모형실험, 현장계측 방법 등을 이용하여 많이 수행되어 왔으며, 이러한 연구를 통하여 지표침하의 형태는 가우스 정규 확률 분포곡선(Gauss normalized probability function)의 형상으로 표현됨이 밝혀졌다. 터널 굴착에 따른 지표침하의 일반적인 형태는 Fig. 6과 같으며, 여기서 S_{max} 는 수렴 후 터널 중심에서의 최대지표 침하량, x 는 터널 중심으로부터의 횡방향 거리이고 i 는 침하곡선의 최대경사 위치이다.

본 연구에서는 기존의 연구를 바탕으로 지반물성과 지층두께를 인자로 한 매개변수 연구결과를 Levenberg-Marquadt 방법에 의한 비선형 회귀분석을 사용하여 횡방향 지표침하량 예측함수식을 도출하였다.

4.1 단순회귀분석

Fig. 6과 같은 횡방향 지표침하 예측식을 구하기 위하여 수치해석 결과를 지수함수 형태의 다음의 식에 대해 단순회귀분석을 수행하여 i 와 k 를 결정하였다.

$$S = S_{max} \cdot e^{(-x^2/ki^2)} \quad (1)$$

여기서 x 는 터널 중심으로 부터의 횡방향 거리이며, 상수 k 와 변곡점 i 는 지반의 특성과 지층두께에 따라 결정되는 계수이다.

Fig. 7과 Fig. 8은 지반의 탄성계수에 따른 변곡점 i 의 위치와 미지계수 k 를 도시한 그래프이다. 지반 A의 경우 UAM 미적용시 지층두께가 증가함에 따라 i 는 4.3 m에서 13.7 m까지 변화하고 k 는 2.4에서 2.9까지 미소

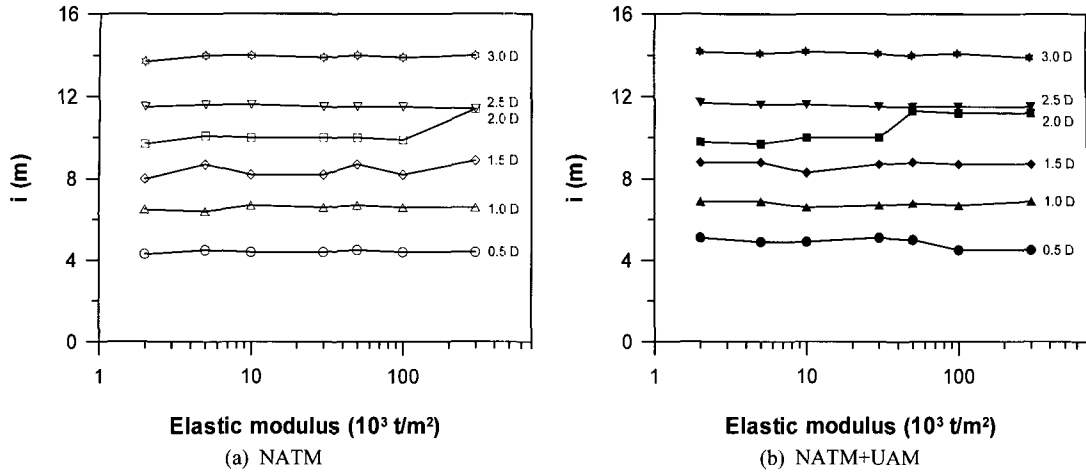


Fig. 7. Variation of inflection point *i* with increasing elastic modulus.

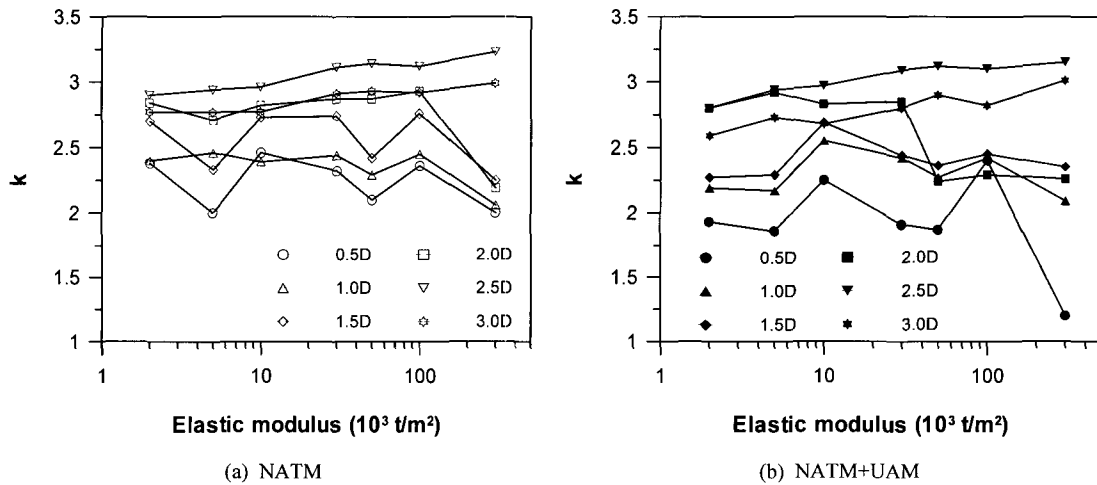


Fig. 8. Variation of coefficient *k* with increasing elastic modulus.

하게 변화하였으며, UAM을 적용할 경우에도 *i*는 5.1 m에서 14.2 m까지 그리고 *k*는 1.93에서 2.8까지 변화하여 유사한 경향을 나타내었다. 지반 B의 경우도 지반 A와 같은 경향을 나타내며, UAM 미적용시 지층두께가 증가함에 따라 *i*는 4.5 m에서 14.0 m까지, *k*는 2에서 2.94까지 변화하고 UAM을 적용할 경우에 *i*는 4.9 m에서 14.1 m, *k*는 1.86에서 2.94까지 변화하였다.

풍화암에 해당하는 지반 C의 경우 UAM 미적용시 *i*는 지층두께에 따라 4.4 m에서 13.9 m까지, *k*는 2.46에서 2.96까지 변화하며, UAM 적용시 *i*는 4.9 m에서 14.2 m까지, *k*는 2.25에서 2.97까지 변화하였다. 지반 D의 경우는 UAM을 적용하지 않은 경우 지층두께가 증가함에 따라 *i*는 4.4 m에서 13.9 m까지 변화하고 *k*

는 2.32에서 3.11까지 변화하였으며, UAM을 적용할 경우의 *i*, *k*는 UAM을 적용하지 않은 경우와 유사한 값을 나타내었다. 지반 E의 경우 UAM 적용시 *i*가 5.0 m에서 14.0 m까지 증가하고 *k*는 1.87에서 3.12까지 변화하였다.

연암 지반인 지반 F의 경우 UAM 적용시 지층두께에 따라 *i*는 4.5 m에서 14.1 m으로, *k*는 2.4에서 3.1까지 변화하였으며, 지반 G의 경우 *i*는 4.5 m에서 13.9 m까지 증가하고 *k*는 1.2에서 3.15까지 변화하였다.

횡방향 지표침하량 예측식의 미지계수인 *i*와 *k*는 Fig. 7 및 Fig. 8과 같이 지반의 탄성계수에는 큰 영향을 받지 않았으나 지층두께에 비례하여 증가하였으며, UAM 적용시는 UAM 미적용시에 비해 미지계수인 *i*는 최대

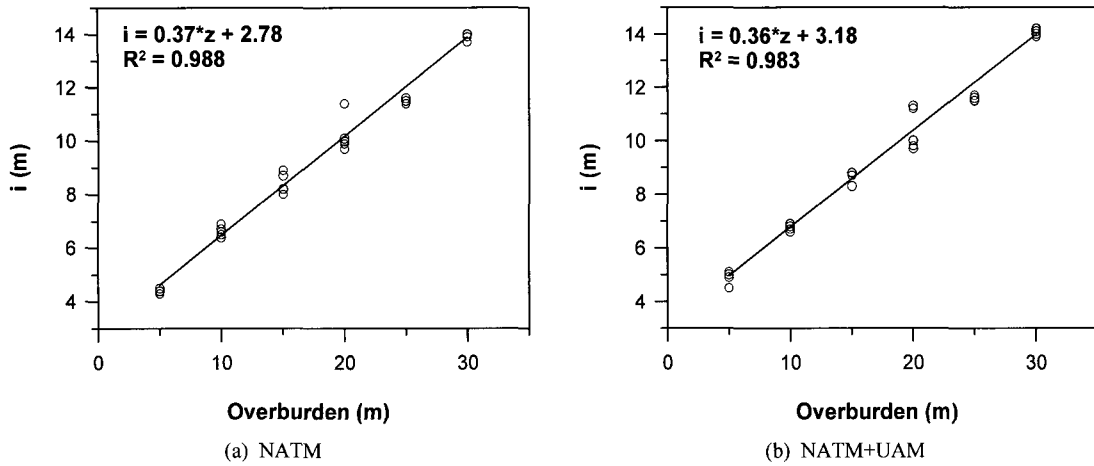


Fig. 9. Regression results of inflection point *i* with increasing overburden.

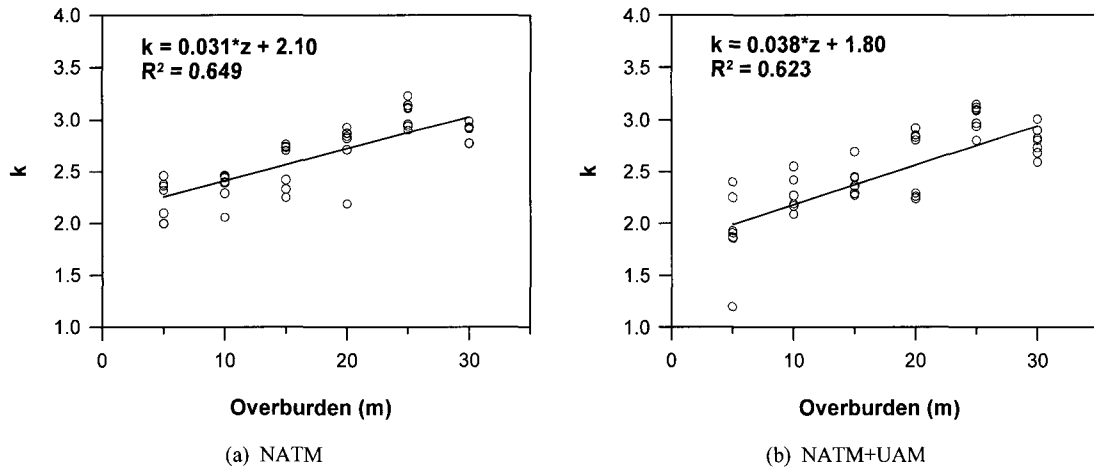


Fig. 10. Regression results of coefficient *k* with increasing overburden.

19% 정도 증가하고 *k*는 최대 22% 정도 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 지표침하량 예측에 있어 미지계수 *i*는 Fig. 9와 같이 지층두께에 대해 1차원 선형함수로 표현이 가능하며, 미지계수 *k*는 Fig. 10에서와 같이 지층두께가 증가함에 따라 미소하게 변화하여 약 2~3의 범위를 나타내었다. 회귀분석 결과 *i*의 결정계수 (coefficient of determination)가 0.98 이상 그리고 *k*의 결정계수는 0.62이상으로 적합도가 비교적 양호하게 나타났다.

4.2 다중회귀분석

터널중심에서의 수렴후 최대 지표침하량(S_{max})을 전산해석 결과를 근거로 식(2)의 형태로 가정하여 지층두

께와 지반의 탄성계수 그리고 침하량에 대한 다중회귀 분석을 수행하였다.

$$S_{max} \left(\frac{1}{E}, z \right) = a \frac{1}{E} + b z + c \frac{z}{E} + d \quad (2)$$

여기서, *E*는 지반의 탄성계수이고 *z*는 터널천단으로부터 지표면까지의 지층두께이다.

다중회귀분석 결과, 횡방향 최대 지표침하량은 Fig. 11과 같이 지반의 탄성계수에 반비례하고 지층두께에 비례하였다. 최대 지표침하량은 UAM 미적용시 식(3)으로 표현되고 UAM 적용시에는 식(4)로 나타났으며, 제시된 최대 지표침하량 예측식의 결정계수는 UAM을 적용하지 않았을 경우에는 0.98, UAM을 적용하였을 경

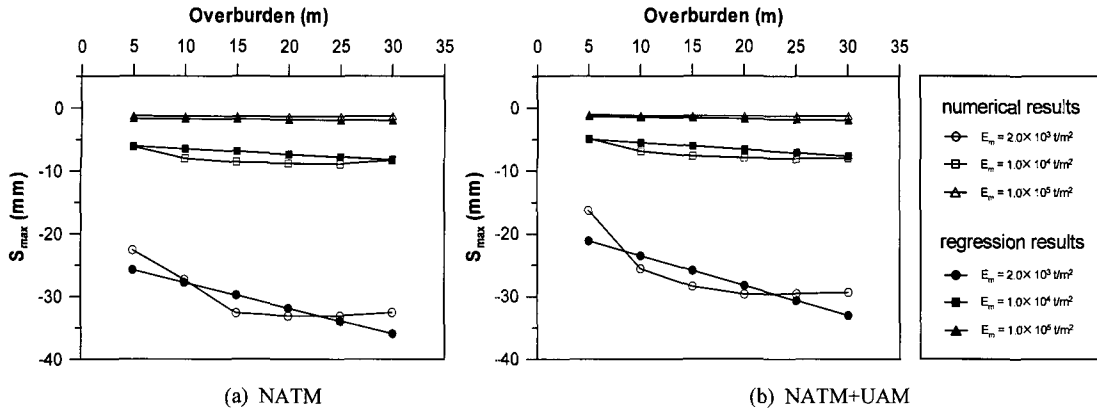


Fig. 11. Maximum surface settlement S_{max} with overburden and elastic modulus.

우에는 0.97 이상으로 비교적 높은 상관관계를 나타내었다.

$$S_{max} = -\frac{4.5122 \times 10^4}{E} - 5.3075 \times 10^{-3} \cdot z - 8.06289 \times 10^2 \left(\frac{z}{E}\right) - 1.1488, \quad R^2 = 0.984 \quad (\text{UAM 미적용}) \quad (3)$$

$$S_{max} = -\frac{3.57298 \times 10^4}{E} - 1.4933 \times 10^{-2} \cdot z - 9.2189 \times 10^2 \left(\frac{z}{E}\right) + 8.8851 \times 10^{-1}, \quad R^2 = 0.975 \quad (\text{UAM 적용}) \quad (4)$$

5. 결 론

본 연구에서는 UAM이 적용되는 연약지반을 대상으로 3차원 유한요소해석을 실시하여 UAM 적용에 따른 지표침하 감소량과 그 보강효과를 분석하였다. 또한, 탄성계수로 표현되는 지반물성과 터널천단부로부터의 지층두께에 대한 매개변수 연구와 회귀분석을 통하여 터널굴착에 따른 횡방향 지표침하량을 예측할 수 있는 함수식을 도출하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) UAM을 적용한 경우는 UAM 적용하지 않은 경우에 비해 토사터널에서 지층두께에 따라 지표침하량이 9%~27% 정도, 풍화암 터널에서 4%~24%정도 그리고 연암터널에서 4%~17% 정도 감소하였다. 따라서 지층두께와 지반물성의 영향을 받아 지반이 연약하고 지층두께가 낮을수록 UAM의 보강효과가 우수하게 나타났다.
- 2) UAM 적용시 최대 경사가 발생하는 변곡점 i의 위치가 지반 A~B의 토사터널의 경우 최대 19%, 지반

C~E의 풍화암 터널의 경우는 최대 13%, 지반 F~G의 연암 터널의 경우는 최대 13% 정도 증가하였다. UAM 적용시 침하발생 영역이 UAM을 적용하지 않았을 경우에 비하여 증가하며, 이는 UAM 적용에 의해 터널 측벽부 보다는 천단부에 대한 구속효과가 큰 반면에 터널 측벽부에 대한 구속효과가 상대적으로 작기 때문으로 판단된다. 따라서 지층두께가 낮은 연약지반 터널 굴착시 지표침하를 최대한 억제하고 지상구조물의 안정성을 확보하기 위해서는 횡방향 보강 범위를 증대시켜야 함을 알 수 있다.

- 3) 단순회귀분석 결과, 최대침하량(S_{max})으로 표현되는 횡방향침하량 예측식의 미지계수 i와 k는 탄성계수에 대한 영향은 거의 없으나, 지층두께와 상관관계를 나타내었다. 지층두께가 증가할수록 i는 1차원 선형함수로 표현되고 k는 약 2~3의 범위를 나타내며, 회귀분석에 의한 결정계수가 각각 0.98과 0.62이상으로서 비교적 양호한 적합성을 나타낸다.
- 4) 다중회귀분석에 의해 최대 지표침하량(S_{max})의 예측식을 제시하였으며, 제시된 식은 UAM을 적용하지 않았을 경우에는 0.984의 결정계수를 나타내고 UAM 적용시에는 0.975의 결정계수를 나타내어 비교적 높은 적합성을 나타낸다.
- 5) 터널굴착에 따른 횡방향 지표침하량 예측식은 지반의 탄성계수와 지층두께를 변수로 수렴후 최대 지표침하량(S_{max}), 그리고 미지계수 i, k로 표현되는 지수함수 형태로 표현할 수 있다. 이 예측식으로부터 설계단계와 시공전 터널굴착에 따른 침하량 예측이 가능하며, UAM의 보강효과 및 터널자체의 안정성과 인접한 지상구조물의 안정성 평가에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.
- 6) 본 연구 결과가 UAM의 적용효과에 대한 기존의 연

구 및 현장실측 내용과 유사하여 설계 및 시공단계에서 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 본 연구는 터널굴착에 의한 지반의 압밀침하가 고려되지 않았고 그라우트재가 지반에 균질하게 주입되었다고 가정하였으며 천층의 연약지반 터널에 한정된다. 향후에는 본 연구결과를 바탕으로 현장실측치와의 지속적인 비교·연구를 통하여 다양한 현장 적용성 연구가 뒤따라야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김선홍, 문현구, 2002, Umbrella arch 공법의 보강효과 및 천단침하량 예측에 관한 연구, 한국자원공학회, 39.3, 197-205.
2. 김광진, 문현구, 2001, 터널막장 선행보강 효과에 관한 이론적·수치해석적 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 11.4, 328-338.
3. 김창용, 배규진, 문현구, 최용기, 1998, Umbrella Arch 공법이 적용된 터널의 3차원 유한요소 해석에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 8.3, 209-225.
4. 김형탁, 이봉렬, 김학문, 1995, 3차원 터널 해석에 의한 강

관 다단그라우팅의 보강효과, '95 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, II-25-38.

5. 배규진, 김창용, 문홍득, 홍성완, 1997, Umbrella Arch 공법에 의한 터널 천단부 보강시 주변 지반의 거동에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 7.4, 299-309.
6. 이준석, 1998, 복합 항복합수를 이용한 그라우팅 강화터널의 탄소성 해석에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 18.III-2, 207-215.
7. 한국건설기술연구원, 1998, 지하생활공간 개발 요소기술 개발 연구; 지반굴착 기술분야 (V), 37-98.
8. Harazaki, I., Aono, H., Matsuda, A., Aoki, T. and Hakoishi, Y., 1998, Field observation of large tunnel supported by umbrella method: Case of Maiko Tunnel in Kobe, Japan, Proc. of the World Tunnel Cong. 98 on Tunnels and Metropolises, 2, 1009-1014.
9. Pelizza, S. and Peila, D., 1993, Soil and Rock Reinforcements in Tunnelling, Tunnelling and Underground Space Technology, 8.3, 357-372.
10. Pelizza, S. and Peila, D. and Oreste, P. P., 1994, A new approach for ground reinforcing design in tunnelling, soil and rock reinforcements, Tunnelling and Ground Conditions, Abdel Salem(ed), Balkema, 267-271.

김 선 홍



1989년 2월 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1991년 2월 한양대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2000년 2월 한양대학교 대학원 지구환경시스템공학과 박사수료
 Tel: 02-6202-0832
 E-mail: shkim@yooshin.co.kr
 현재 유신코퍼레이션 터널부 이사, 한양대학교 지구환경시스템공학과 박사수료

문 현 구



1974년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1983년 Univ. of Utah 암석역학공학석사
 1987년 Univ. of Utah 암석역학공학박사
 Tel: 02-2290-0413
 E-mail: hkmoon@email.hanyang.ac.kr
 현재 한양대학교 공과대학 시스템응용공학부 지구환경시스템공학과 교수