

**Umbrella Arch 공법이 적용된 철도터널의  
강관보강효과에 관한 수치해석적 연구**  
**A Numerical Study on Reinforced effect of the Railway  
Tunnel by Umbrella Arch Method**

이현석\*  
Lee, Hyun Suk

이준석\*  
Lee, Jun S.

방춘석\*  
Bang, Chun Suk

김연태\*\*  
Kim, Yun Tae

---

Abstract

Umbrella Arch Method(UAM), among others, is commonly applied to increase the facial stability during tunnel excavation and, depending on the field condition, additional reinforcement techniques can be used simultaneously. UAM, together with grouting method, is normally used to reduce ground permeability and improve stability of the tunnel by inserting a series of steel pipes into the ground around the crown inclined to the longitudinal axis of the tunnel. However, there has not been much rigorous study on the effectiveness of UAM, and most of UAM installations depend on empirical judgement rather than on engineering calculation. In this study, the effectiveness of UAM is demonstrated based on the constitutive relationship involving UAM derived from the mechanics of composite material, and the numerical investigation is compared with small scale experiments on the tunnel reinforcement.

---

**1. 서론**

일반적으로 파쇄가 심한 연약한 지반이나 토사터널 굴착시 안정성 강화대책으로 보조공법을 수행하게 되는 경우가 자주 발생하며 고속철도 및 지하철 터널 현장 역시 다양한 보조공법이 수행되고 있다. 이런 보조공법의 설계는 경험적이거나 실험적인 보강효과를 바탕으로 수행되고 있으며 정밀한 수치해석기법은 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 보조공법중 Umbrella Arch 공법(UAM)을 대상으로 해석기법 및 보강효과를 수치적으로 분석하였다. UAM은 터널 천단부에서 굴진방향으로 강관을 삽입한 후 그라우트재를 주입함으로써 터널 주위의 선행보강을 통해 막장의 안정성을 증대시키는 보조공법으로 터널 안정에 상당히 효과적인 공법임이 증명된 바 있다 (김창용 2000). 또한 UAM 공법에 대한 수치해석 모델은 Kotake등(1994)에 의하여 연구되어 왔으나, 본 연구에서는 복합체 역학(mechanics of composite material) 및 변형률 에너지 이론에 근거하여 UAM 보강지반의 직교이방성 물성값을 도출하였으며, 이를 바탕으로 보강효과를 수치해석적으로 분석하였다. 모델은 방춘석 등(2000)에서 사용된 모형터널 굴착실험과 비교하여 검증하였으며, 특히 강관을 보요소로 모델링하여 순수 강관의 보강효과를 정량적으로 분석하였다.

---

\* 한국철도기술연구원, 정회원

\*\* 서울산업대학교 교수, 정회원

## 2. Umbrella Arch 공벽(UAM)에 의한 강화지반 물성값 특성 도출

UAM으로 강화된 지반의 직교 이방성 물성은 그림 1과 같이 원통형 강관을 원지반내에 평면 혹은 경사면 형태로 분산시키는 방법으로서 터널 굴진방향과 평행한 분산방향으로 고려할 수 있다. 이는 이준석(1997)등이 압밀그라우팅에 직교이방성 물성과 유사하며 그림 1과 모델을 이용한 각 구성체의 평형 및 적합방정식을 이용하여 UAM에 의한 강화지반 물성값을 유도하였다. 그림 1은 UAM을 실시한 대표적 지반을 나타내고 있으며 강화지반의 물성을 도출하기 위하여 강관다단이 원지반에 직교 이방성으로 분포되어 있다고 가정한다.

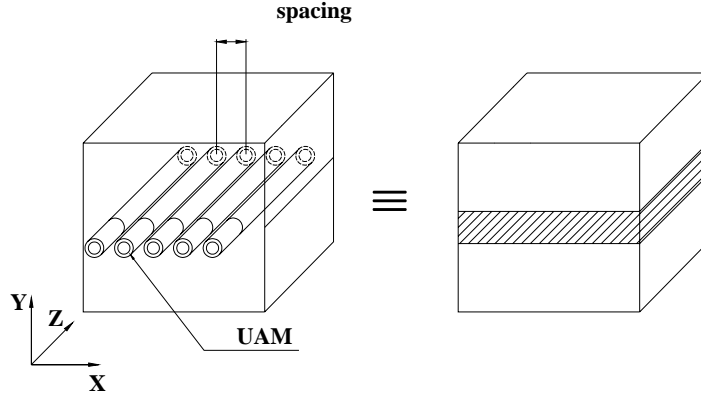


그림 1. UAM에 의한 강화지반의 대표체적요소

우선 원지반과 강관다단의 체적비를 각각  $\mu_r$  및  $\mu_g$ 라 하면 전체대표체적 (Representative Elementary Volume, REV) 에 대한 각 체적비의 관계식은

$$\mu_r + \mu_g = 1 \quad (1)$$

로 표시할 수 있으며 강관다단과 원지반의 강화된 복합체의 평균 응력 및 평균 변형률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= \left\{ \bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y, \bar{\sigma}_z, \bar{\tau}_{xy}, \bar{\tau}_{yz}, \bar{\tau}_{zx} \right\}^T \\ \bar{\epsilon} &= \left\{ \bar{\epsilon}_x, \bar{\epsilon}_y, \bar{\epsilon}_z, \bar{\gamma}_{xy}, \bar{\gamma}_{yz}, \bar{\gamma}_{zx} \right\}^T \end{aligned} \quad (2)$$

또한 각 재료의 구성방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_r &= [D^r] \epsilon_r \\ \sigma_g &= [D^g] \epsilon_g \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, r은 원지반, g는 강관다단을 의미하며  $[D]$ 는 강성도 행렬을 나타낸다. 여기서 원지반과 강관다단 사이의 평형조건 및 적합조건을 고려하면 다음과 같은 부가방정식을 도입할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{xi} &= \bar{\sigma}_x + A_{xi}, \quad \sigma_{yi} = \bar{\sigma}_y, \quad \sigma_{zi} = \bar{\sigma}_z + A_{zi} \\ \tau_{xyi} &= \bar{\tau}_{xy}, \quad \tau_{yzi} = \bar{\tau}_{yz}, \quad \tau_{zxi} = \bar{\tau}_{zx} + A_{zxi} \\ \epsilon_{xi} &= \bar{\epsilon}_x, \quad \epsilon_{yi} = \bar{\epsilon}_y + B_{yi}, \quad \epsilon_{zi} = \bar{\epsilon}_z \\ \gamma_{xyi} &= \bar{\gamma}_{xy} + B_{xyi}, \quad \gamma_{yzi} = \bar{\gamma}_{yz} + B_{yzi}, \quad \gamma_{zxi} = \bar{\gamma}_{zx} \end{aligned} \quad (4)$$

변형률에너지 방정식과 식 (4)를 이용하면 부가응력 조건식을 구할 수 있다. 이 부가응력에 대한 조건식을 식 (3)에 대입하면 다음과 같이 복합체의 물성값을 도출할 수 있다.

$$\overline{E}_x = \frac{\gamma^2 - \delta^2}{\gamma}, \quad \overline{\nu}_{xy} = \frac{\beta(\gamma - \delta)}{\gamma}, \quad \overline{\nu}_{xz} = \frac{\delta}{\gamma} \quad (5)$$

$$\overline{E}_y = \frac{\gamma + \delta}{\alpha(\gamma + \delta) + 2\beta^2}, \quad \overline{\nu}_{yx} = \frac{\beta}{\alpha(\gamma + \delta) + 2\beta^2}, \quad \overline{\nu}_{yz} = \frac{\beta}{\alpha(\gamma + \delta) + 2\beta^2} \quad (6)$$

$$\overline{E}_z = \frac{\gamma^2 - \delta^2}{\gamma}, \quad \overline{\nu}_{zy} = \frac{\beta(\gamma - \delta)}{\gamma}, \quad \overline{\nu}_{zx} = \frac{\delta}{\gamma} \quad (7)$$

$$\frac{1}{\overline{G}_{xy}} = \sum_{i=1}^2 \frac{\mu_i}{G_{xyi}}, \quad \frac{1}{\overline{G}_{yz}} = \sum_{i=1}^2 \frac{\mu_i}{G_{yzi}}, \quad \overline{G}_{zx} = \sum_{i=1}^2 \mu_i G_{zxi} \quad (8)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \alpha &= \sum_{i=1}^2 \frac{\mu_i(1+\nu_i)(1-2\nu_i)}{(1-\nu_i)E_i} \\ \beta &= \sum_{i=1}^2 \frac{\mu_i\nu_i}{(1-\nu_i)} \\ \gamma &= \sum_{i=1}^2 \frac{\mu_i E_i}{(1-\nu_i^2)} \\ \delta &= \sum_{i=1}^2 \frac{\mu_i\nu_i E_i}{(1-\nu_i^2)} \end{aligned} \quad (9)$$

로 된다.

이상에서와 같이 원지반에 강관다단 보강을한 경우에 대해서 최종 복합체의 구성방정식과 물성값을 유도하였으며 식(19)와 같이 최종 강성도 행렬은 직교이방성의 성질을 지니고 있다. 결국 UAM으로 보강된 지반의 최종 구성방정식은 다음 식과 같이 나타낼 수 있으며, 이 경우 현장 시공에 따른 상호작용에 대한 영향은 고려하지 않았다.

$$\{\overline{\varepsilon}^{(1)}\} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\overline{E}_x} & -\frac{\overline{\nu}_{xy}^{(1)}}{\overline{E}_x^{(1)}} & -\frac{\overline{\nu}_{xz}^{(1)}}{\overline{E}_x^{(1)}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\overline{\nu}_{yx}^{(1)}}{\overline{E}_y^{(1)}} & \frac{1}{\overline{E}_y^{(1)}} & -\frac{\overline{\nu}_{yz}^{(1)}}{\overline{E}_y^{(1)}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\overline{\nu}_{zx}^{(1)}}{\overline{E}_z^{(1)}} & -\frac{\overline{\nu}_{zy}^{(1)}}{\overline{E}_z^{(1)}} & \frac{1}{\overline{E}_z^{(1)}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\overline{G}_{xy}^{(1)}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\overline{G}_{yz}^{(1)}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\overline{G}_{zx}^{(1)}} \end{bmatrix} \{\overline{\sigma}^{(1)}\}$$

### 3. 수치해석에 의한 강관다단의 보강효과 분석

본 연구에서 수행한 수치해석 모델은 토조를 이용한 실제모형터널 굴착시험을 바탕으로 토조의 제원은 210×240×225(L×W×H)로 그림 2와 같이 모형화 하였다.

수치해석에 사용된 해석프로그램은 터널의 굴착 및 그 거동에 대한 선형, 비선형 해석이 모두 가능한 범용 유한요소프로그램인 ABAQUS를 이용하였다. 그림 3과 같이 수치해석모델은 대칭성

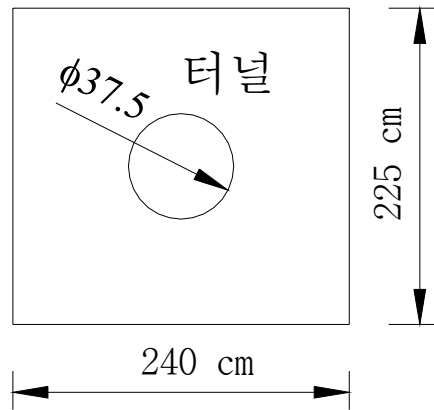


그림 2. 원지반의 제원

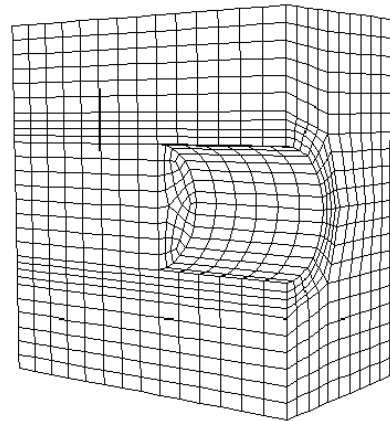


그림 3. 수치해석모델

을 고려하여 실제 모형의 1/2를 모형화 하였으며 총 4589개 절점과 3948개의 solid 요소로 지반을 모형화 하였다. 구속조건은 상부의 자유단을 제외한 모든면은 그 면에 수직한 방향으로 고정시켰고 강관은 굴착방향과 평행하게 설치하였으며, 설치영역은 터널 크라운부에 135°로 12개를 사용하였다. 강관의 직경은 3.2cm, 두께는 0.3cm로 가정하였고 굴착은 초기응력상태를 포함하여 15cm씩 굴진하여 총 14단계로 수행하였다. 수치해석에 사용된 원지반의 물성값과 복합체의 물성값은 다음의 표 1 과 같다.

표 1. 강화지반의 직교이방성 물성값

	$E_x$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_z$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\nu_{xy}$	$\nu_{xz}$	$\nu_{yz}$	$G_{xy}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$G_{xz}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$G_{yz}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
원지반	150	150	150	0.27	0.27	0.27	60	60	60
그라우트재	480	232	480	0.13	0.22	0.13	80.5	198	80.5
UAM	4410	191	4410	0.31	0.17	0.31	60.9	1880	60.9

실제 모형실험시 계측점은 터널 크라운에서 상단 10cm, 우측으로 10cm, 길이방향으로 90cm의 위치에서 연직변위를 측정하였으며, 수치해석에서도 이와 동일한 절점에서의 연직변위를 산정하였다.

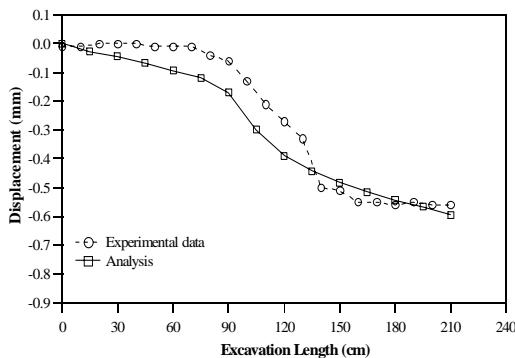


그림 4. 무보강 원지반의 굴착단계별 연직변위

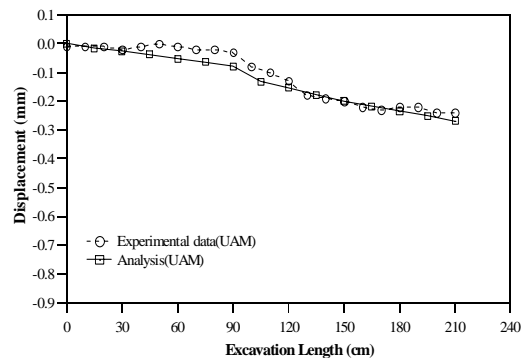


그림 5. UAM 보강지반의 굴착단계별 연직변위

수치해석 결과, 그림 4에서 알 수 있듯이 연직변위는 전형적인 S형상의 변위양상을 나타내고

있음을 알 수 있다. 또한 모형실험값의 최종 변위값은 0.56mm, 수치해석상 변위는 0.59mm로 5% 이내이므로 수치적 모델에 굴진효과가 제대로 수행되었음을 알 수 있다. UAM보강인 경우에 모형 실험값은 0.24mm고 수치해석 결과는 0.27mm로, 직교이방성 복합체 물성을 이용했을 때 실험값과 유사함을 알 수 있었다.

한편 UAM에 사용된 강관을 효율적으로 모델링하기 위하여 다음과 같은 매개변수 해석을 수행하였다. 먼저 그림 6은 UAM보강시 실제강관이 안정성에 미치는 영향을 검증하기 위하여 강관을 삽입한 경우와 삽입하지 않은 경우에 대하여 직교이방성 복합체물성을 이용한 수치해석 결과를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 강관이 포함된 경우가 제외된 경우보다 0.14mm 정도의 보강효과로 본 지반상태인 경우에 강관 자체의 보강효과는 50% 정도가 됨을 알 수 있었다. 다음으로 직교이방성 복합체물성의 UAM적용과 실제 강관보강이 미치는 영향을 분석하기 위하여 보요소로 직접 모델링하였다.

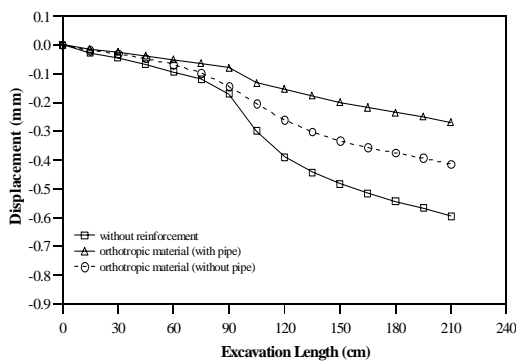


그림 6. 강관 유·무에 따른 UAM 보강효과

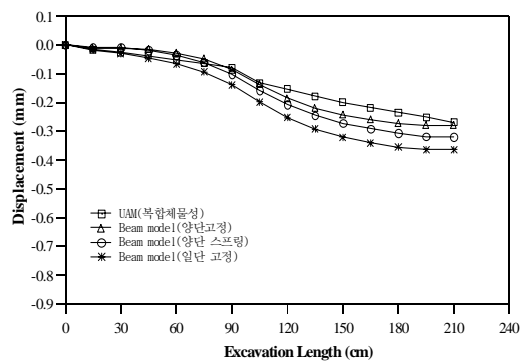


그림 7. 강관 경계조건 따른 UAM 보강효과

실제 수치해석시 강관만의 거동을 파악하는 것은 쉬운 일이 아니며, 김창용(1998)등은 강관과 구근이 형성된 그라우트재가 상호고려된 물성치를 강관의 물성치를 이용한 연구도 수행되었다. 본 연구에서는 강관에 주입된 그라우트재의 물성값은 직교이방성 복합체물성을 이용하였으며, 강관은 보요소를 사용하여 직접 모델링한 후 그 보강효과를 분석하였다. 이 결과, 강관에 대한 별도의 경계조건을 부여하지 않았을 경우 보강효과를 정확하게 산정할 수 없었으며, 강관의 경계조건 변화를 통하여 순수강관에 대한 보강효과를 분석하였다. 그림 7에서 알 수 있듯이, 최종 굴착부의 강관을 캔틸레버로 고려할 경우는 강관의 효과가 적은 것으로 나타났다. 이는 굴착하는 동안의 지반 변위 및 슛크리트 등의 역할이 고려되지 않았기 때문으로 판단된다. 양단을 스프링으로 사용할 경우는 보강효과가 잘 반영되었다. 이것은 실제로 터널지보재가 사용될 경우, 이에 대한 반력계수를 적절히 고려해야 함을 보여주고 있다. 마지막으로 양단을 고정했을 경우, 이는 실제거동과는 다소 거리가 있지만 직교이방성을 이용한 UAM보강효과 및 실험결과와 가장 유사한 결과를 보여주고 있다. 이 결과를 볼 때 다양한 지질 변수들을 고려해야 하지만 특히 강관사용시 지보재 뿐만 아니라 슛크리트 등에 의한 지지반력계수가 충분히 고려되어야 수치해석시 강관의 보강효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 연약지반을 통과하는 철도터널의 보조공법중 UAM에 대한 보강효과와 해석모델 기법을 분석하였다. 이를 위하여 모형터널 굴착실험을 수행하였으며 이를 바탕으로 한 수치해석을 통하여 UAM보강효과를 분석하였다. 복합체역학 및 변형에너지 이론에 의하여 구성관계식을 도출하였으며, UAM에 의한 보강지반을 도출된 직교이방성 복합체물성을 사용하여 수치해석결과를

수행하였다. 모델의 검증은 모형실험을 통한 연직변위와 비교할 때 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 UAM내의 강관에 대한 역할을 알아보기 위해서 강관을 직접모델링한 경우와 비교하였으며, 결과적으로 강관에 대한 수치해석을 위해서는 슛크리트와 보조 지보재에 대한 영향을 실제 시공에 맞게 고려하여야 할 것으로 판단된다. 또한 상세한 해석이 필요치 않은 초기단계의 터널거동 분석 시에는 직교이방성 물성을 이용한 UAM 모형화 방안도 타당한 대안이 될 수 있음을 보였다. 향후에는 실제 steel rib와 슛크리트 등을 고려한 정밀해석을 통하여 강관에 발생하는 모멘트와 축력 등을 검토할 수 있을 것이며 분산형 모형의 단점을 보완할 수 있는 기법의 개발도 가능할 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. 김창용 등, "Umbrella Arch 공법이 적용된 터널의 3차원 유한요소 해석에 관한 연구" 한국암반공학회, Vol. 8. pp. 209-225, 1998
1. 방춘식 등, "그라우팅 및 강관다단 병용공법의 설계기법에 관한 연구", 대한토목학회논문집, Vol. 21,5-C, pp.487-494, 2000
2. 유충식 등, "3차원 유한요소해석에 의한 Umbrella Arch 공법으로 보강된 터널의 거동해석", KGS Fall '95 National Conference 28,October, 1995
2. 이준석 등, "그라우팅 보강터널의 탄소성 해석에 관한 연구", 대한토목학회논문집, Vol. 17,3-5호, pp.531-539, 1997
3. Kotake, N., Yamamoto, Y. & Oka, K. (1994) Design for Umbrella Method based on Numerical Analysis and Field Measurements, Proc. Tunnelling & Ground Conditions, Ed. M. Abdel Salam, PP. 501-508
4. Lee, J. S., Bang, C. S., Mok, Y. J. & Joh, S. H. , Numerical and experimental analysis of penetration grouting in jointed rock masses, I. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 37, pp.1027-1037. 2000