

3차원 유한요소해석에 의한 Umbrella Arch 공법으로 보강된 터널의 거동 해석
Three-Dimensional Finite Element Analysis on Tunnel Behavior Reinforced by Umbrella Arch Method

유충식, Chung-Sik Yoo*

신승우, Seung-Woo Shin**

김영준, Young-Jun Kim**

김연정, Youn-Jung Kim***

* 정회원, 성균관대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Sung Kyun Kwan Univ., Seoul

** 성균관대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Sung Kyun Kwan Univ., Seoul

***정회원, 성균관대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Sung Kyun Kwan Univ., Seoul

SYNOPSIS: In recent years, NATM has been successfully applied to difficult ground conditions with the use of soil-preserving intervention methods which promote face stability and restrict excessive ground movement. When the tunnel excavation is made through difficult ground like highly weathered rock, the umbrella arch method is often adopted which pre-reinforces tunnel crown periphery using a stiff shell-shaped structure. The umbrella arch method was originally developed in Italy, and has recently been confirmed its effectiveness in Korea as well. However, no in depth study on the umbrella arch method has been conducted and as a result no rational analysis/design method is available at present. Therefore this study was undertaken with the aim of identifying the basic reinforcing mechanism and establishing both qualitative and quantitative relationships between various design parameters and ground movements.

1. 서론

NATM 공법은 지반조건이 불량한 경우에도 적절한 보조공법을 병행함으로써 터널의 안정을 확보하고 과도한 지반의 움직임을 억제하며 시공이 가능한 공법이다. 터널굴착시 터널천단 상부 암층의 두께가 충분치 않거나 과도하게 풍화된 풍화암층 등 불량한 지반을 만나게될 경우 굴착전에 터널 천단 상부에 강성이 큰 원추형의 쉘 구조체를 형성하여 지반을 선행 보강(pre-reinforcement)하는 이른바 umbrella arch 공법이 활발히 적용되고 있다. Umbrella arch 공법은 이태리에서 개발되어 국내에서도 많은 현장에 적용되고 있어 효과적인 보조공법으로 인정받고 있다. Umbrella arch 공법은 터널 주위의 선행보강을 통해 막장의 안정성을 증대시킴으로써 분할 굴착을 피할 수 있게 하여 대단면 굴착을 가능하게 하며 따라서 공기 단축의 잇점이 있으며, 특히 대단면 터널 혹은 도심 터널 시공에 있어서 과도한 지표침하가 우려되는 경우 umbrella 공법을 적용함으로써 터널자체의 안정확보는 물론 주변 환경에 미치는 영향을 최소화시킬 수 있다.

본 연구에서 다룬 umbrella arch 공법은 그림 1에서 보이는 바와 같이 굴착 전에 터널 천단 주변의 일정 영역을 강성이 큰 원추형 쉘 구조체로 보강하는 공법을 포괄적으로 의미하며 수평 분사 그라우팅(sub-horizontal jet grouting) 공법, 강관 보강형 다단 그라우팅 공법, 강관 보강형 분사 그라우팅 공법 등이 umbrella arch 공법의 범주에 든다고 할 수 있다. 물론 전술한 공법들은 시공 과정 및 사용되는 보강재료에서 다소 차이를 보이나 기본적인 보강 메카니즘 및 설계 개념은 같다고 할 수 있다.

국내에서는 전술한 공법 중에서 강관 보강형 다단 그라우팅 공법이 많은 현장에서 활발히 적용되고 있다. 그러나 umbrella arch 공법에 관한 체계적인 연구가 부족하여 역학적 보강 메카니즘에 관한 이론정립이 되어 있지 않고 있음은 물론 설계변수에 따른 보강효과에 관한 정성, 정량적인 관계정립이 아직 부족한 관계로 대부분의 경우 공학적 근거보다는 경험에 의존하는 설계가 이루어지고 있기 때문에 본 공법의 보다 효율적인 적용이 어려운 실정이다.

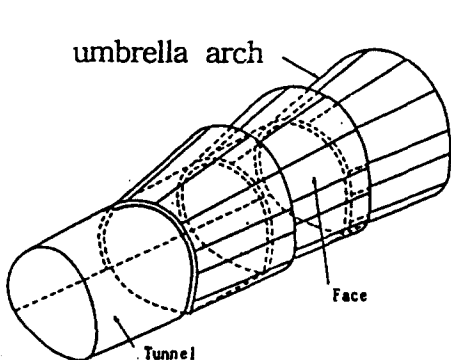


그림 1. Umbrella Arch Method 개요도

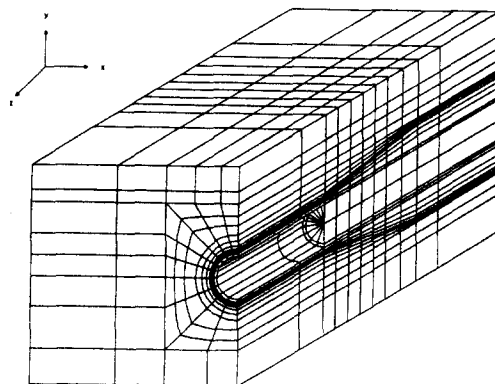


그림 2. 유한요소망

본 연구에서는 umbrella arch 공법의 체계적인 이론정립을 위해 3차원 유한요소해석을 이용하여 본 공법이 제공하는 터널 보강 및 주변지반 거동 억제 효과 등 보강 메카니즘에 관한 체계적인 연구를 수행하였다. 또한 umbrella arch의 경사도, 강성, 보강범위 등의 설계변수에 대한 수치실험적 매개변수 변환연구를 통해 전술한 설계변수를 조합변화시켜 다양한 시공조건에 대한 해석을 수행하고 그 결과를 바탕으로 설계변수와 보강 효과의 정성·정량적인 상관관계를 알아보았다.

2. 유한요소해석

본 연구에서 수행된 유한요소해석에서는 성균관대학교에서 개발된 지반공학 범용 3차원 탄소성 유한요소해석 프로그램인 GEOFE3D가 사용되었다. GEOFE3D는 Nonlinear Hyperbolic 모델, Mohr-Coulomb 및 Drucker-Prager의 탄소성 모델을 이용하여 지반의 비선형 응력-변형 관계를 모사하며 지하굴착 및 터널의 단계별 시공과정을 모사할 수 있는 기능을 갖추었다.

본 연구에서는 직경 8m의 원형터널이 지표면으로부터 16 m 아래에서 굴착되는 경우를 다루었으며 터널의 스프링라인을 기준으로 상부에는 풍화도가 하부에는 풍화암이 위치하는 것으로 가정하였다. 해석을 수행하는데 있어서 터널시공과정을 단순화하여 shotcrete 타설과 함께 10 m 굴착된 후 umbrella arch가 시공되고 다시 굴착-shotcrete 타설의 공정이 수행되는 과정을 모델링 하였으며, 해석의 편의상 steel rib과 rock bolt는 타설되지 않는 것으로 간주하였다.

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서 다루는 umbrella 공법은 불량한 지반조건에서 선행보강(pre-reinforcement)의 개념으로 터널 주위를 따라 umbrella arch의 셀 구조체를 형성하고 형성된 umbrella arch의 beam 및 arch 효과를 통해 막장의 안정을 확보하고 나아가서 터널 및 주변지반의 거동을 억제하는 공법을 포괄적으로 의미하며, 수평 분사 그라우팅, 강관 보강형 다단 그라우팅, 강관으로 보강된 분사 그라우팅 공법 등이 이 범주에 속한다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 특정한 공법을 대상으로 세부적인 모델링을 통한 해석을 수행하기보다는 umbrella arch의 보강 메카니즘에 대한 기초적인 연구를 수행하기 위해, 터널주위에 형성된 umbrella arch를 일종의 합성재료(composite material)로 간주하고 30cm의 두께를 갖는 선형 탄성 고체요소(solid element)로 모델링 하였다.

그림 2는 해석에서 사용된 유한요소망을 보여주고 있는데 유한요소망은 터널 형상, 굴착시공 순서, umbrella arch의 계원 등을 고려하여 형성하였으며, 사용된 요소의 크기 및 주변 경계의 위치는 예비해석을 수행하여 해석 결과에 영향을 미치지 않도록 결정하였다. 표 1은 해석에서 적용된 지반 및 shotcrete의 물성치를 보여주고 있다.

표 1. 지반 및 shotcrete의 물성치

	탄성계수 E (t/m ²)	점착력 (t/m ²)	내부마찰각 φ(degree)	단위중량 γ(t/m ³)	Poisson's Ratio, ν
풍화토	8,000	0	35	2.0	0.3
풍화암	50,000	20	40	2.2	0.35
shotcrete	1,000,000				

3. Umbrella Arch의 보강 메카니즘

Umbrella arch의 보강 메카니즘을 알아보기 위해 그림 3에서 보이는 바와 같이 지름 8m의 터널이 10 m 굴착된 후 터널 천단부가 터널의 중심을 기준으로 좌우 60° 에 걸쳐 경사도와 길이가 각각 5°, 16m이고 지반의 강성에 50배인 강성을 갖는 umbrella arch로 보강된 경우에 대한 해석을 수행하고 그 결과를 분석하여 umbrella arch의 보강 메카니즘을 고찰하였다.

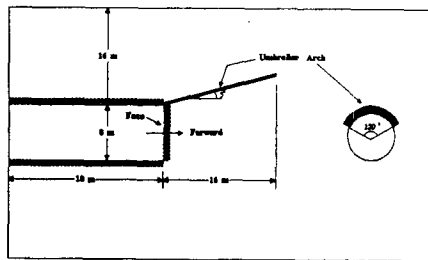


그림 3. 해석 개요도

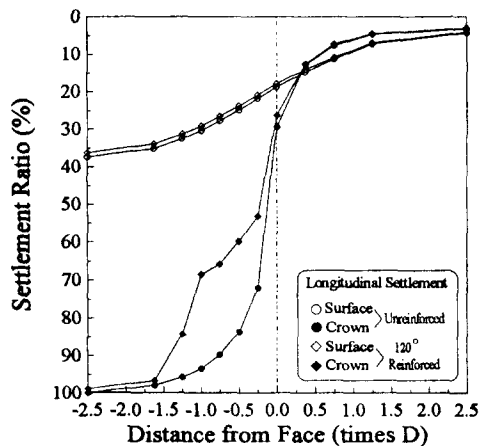


그림 4. 지표 및 천단 침하 곡선(보강범위 120°)

3.1 터널 및 주변지반에서의 변위발생 경향

그림 4는 umbrella arch로 보강된 경우와 보강되지 않은 경우에 있어서 umbrella의 선단으로부터 10m 굴착이 이루어진 경우의 지표 및 천단 침하 곡선을 비교하고 있다. 보이는 바와 같이 umbrella arch로 보강된 구간에서는 천단에서의 침하량이 최대 약 22% 감소되는 경향을 관찰할 수 있으나 지표면에서는 많은 차이를 보이지 않고 있다. 이에 대한 근본적인 원인은 umbrella arch가 터널중심으로부터 좌우 60° 에 걸쳐서 형성되었기 때문에 천단부의 구속효과는 뛰어난데 반해 터널 측벽부와 하반부에서의 거동은 허용하기 때문으로 사료되며 기존의 연구결과(1994)에서 제시한 경향과도 잘 일치한다.

그림 5는 umbrella arch로 보강된 경우와 비보강 경우의 막장에서 0.5D 후방에 위치한 단면에서의 횡단면 변위벡터를 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 umbrella arch의 보강효과에 의해 전체적으로 변위가 억제되는 경향을 볼 수 있으며, 터널 주변에서는 umbrella의 arch 효과에 의해 수평변위가 현저히 억제되는 경향을 관찰할 수 있다. 그러나 보강되지 않은 측벽에서는 여전히 보강되지 않은 경우와 유사한 크기의 변위가 발생하는 경향을 관찰할 수 있어, 지표 침하 억제 효과를 극대화 하기 위해서는 보강범위를 확대하거나 추가적인 터널 측벽부 보강대책이 필요하다는 것을 알 수 있다.

그림 6은 동일한 해석조건에서 umbrella arch의 보강범위를 터널 중심을 기준으로 좌우 90° 로 확장시킨 경우에 대한 침하곡선을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 터널 천단부의 구속효과가 60° 의 경우에 비하여 현저히 증가됨은 물론 지표침하 또한 현저히 감소되는 경향을 관찰할 수 있다. 따라서 본 해석조건과 같이 풍화도가 터널 스프링 라인까지 확장되어 있는 경우 지표침하를 억제하기 위해서는 보강범위를 스프링 라인까지 확대하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

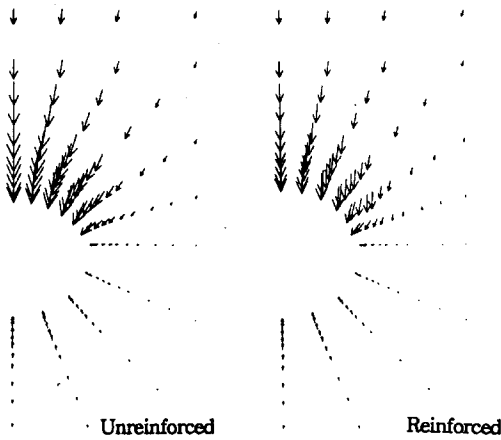


그림 5. 횡단면(-0.5D) 변위 벡터

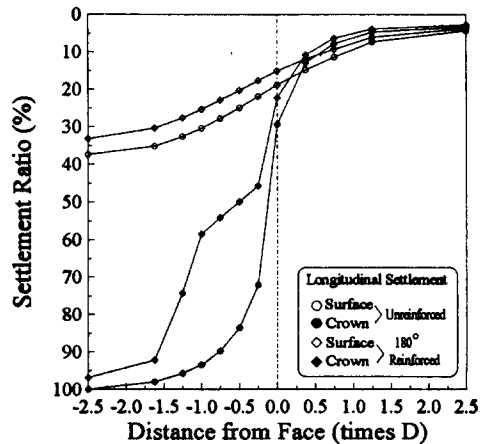


그림 6. 지표 및 천단 침하곡선 (보강범위 180°)

3.2 터널 및 주변 지반에서의 응력분포 경향

Umbrella arch 공법은 터널 주변지반의 이완영역을 감소시키고 상부토압을 분산·지지하는 효과를 통해 터널자체의 안정성을 증대시킨다. 본 연구에서는 터널주변 및 막장의 응력상태를 고찰하고 이를 바탕으로 umbrella arch의 보강 메커니즘을 알아 보았다.

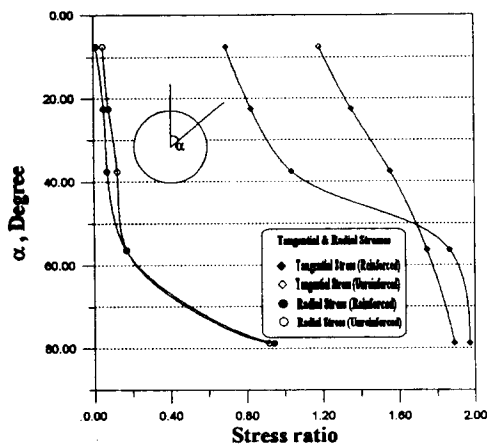
터널이 굴착됨에 따라 응력해방으로 인해 터널주변에서는 반경방향응력이 급속히 감소하는 반면에 접선응력은 증가하여 일축압축의 응력 상태로 접어들게 되며 접선응력이 지반의 강도를 초과하게 되면 소성파괴가 일어나 소형변형이 발생하게 된다. Umbrella arch로 보강된 터널의 경우에는 umbrella arch의 응력재분배 효과로 인해 과도한 응력집중현상을 피할 수 있어 터널 자체의 안정을 확보할 수 있다.

Umbrella arch의 보강에 따른 터널 주변의 응력상태 변화경향을 고찰하기 위해 막장 후방에 위치한 터널 길이방향에 수직인 횡단면(-0.5D)을 대상으로 umbrella arch 내·외측에서의 접선(tangential) 및 방사(radial) 응력을 고찰하였다. 그림 7a에서는 보강된 경우와 보강되지 않은 경우에 있어서 umbrella 내측의 접선 및 방사 응력 분포경향을 초기응력으로 무차원화된 수치로 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 umbrella arch에 의해 보강됨에 따라 터널주변의 방사응력에는 별다른 차이를 관찰할 수 없으나 접선응력의 경우 천단 부근에서 최대 약 40%의 감소 효과를 관찰할 수 있다. 그러나 보강되지 않은 터널 측벽부에서는 응력집중현상이 발생하여 오히려 보강되지 않은 경우보다 다소 큰 접선응력이 발생하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 보강되지 않은 측벽부에서 큰 변위가 발생하는 경향과도 잘 일치하고 있다.

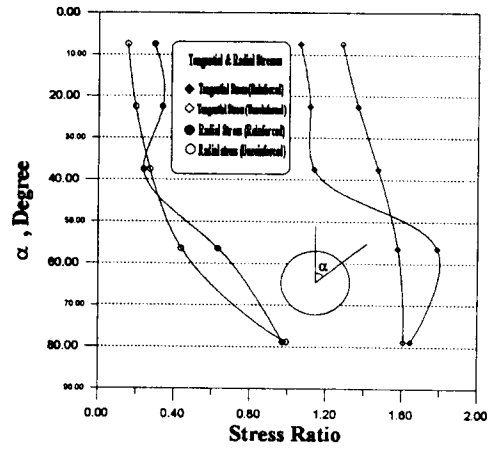
그림 7b는 umbrella 외측에서의 경향을 보여주는데 umbrella 내측에서와 마찬가지로 접선응력은 현저히 감소하고 방사응력은 다소 증가하는 경향을 관찰할 수 있다. 그림 9에서 나타난 경향을 종합해 보면, umbrella arch로 보강됨에 따라 방사응력은 많은 변화를 보이지 않으나 접선응력이 현저히 감소됨을 알 수 있는데 굴착면 주위에서의 접선 및 방사응력은 최대 및 최소 주응력이라고 볼 수 있으므로 이는 Mohr Circle 개념에서 Mohr Circle의 지름이 감소함을 의미하기 때문에 막장 및 주변지반의 안정성이 증대된 것으로 간주할 수 있다.

그림 8은 터널 종단면에서의 umbrella arch 내·외측에서의 수직응력 분포경향을 보여주고 있다. Umbrella arch 외측에서의 수직응력은 umbrella arch에 작용하는 토압으로, 그리고 내측에 접하는 요소에서의 수직응력은 터널에 작용하는 토압으로 간주할 수 있다. 굴착된 영역내에서 발생하는 umbrella arch 내측의 수직응력분포 경향을 보여주고 있는 그림 8a를 관찰해 보면 보강되지 않은 경우에는 막장에 도달하기 전 까지 거의 일정한 수직응력이 작용하는 경향을 볼 수 있으나 umbrella arch로 보강됨에 따라 수직응력이 급격히 감소하여 최대 약 35%의 수직응력이 경감되는 경향을 관찰할 수 있다. 그러나 막장 전면부에서는 다소 증가하여 초기 응력보다 다소 큰 수직응력이 발생하는 경향을 관찰할 수 있는데 이는 umbrella arch로 인한 응력의 재분배 현상에 기인한 것으로 사료된다.

Umbrella arch 외측에 작용하는 수직응력을 보여주고 있는 그림 8b를 살펴보면 터널 천단부에서는 뚜렷한 경감효과를 보이나 측벽부에서는 거의 차이를 보이지 않고 있어 umbrella arch 내측에서의 수직응력 감소 경향과는 다소의 차이를 보이 경향을 보이고 있다. 또한 umbrella arch의 arch 효과로 인해 상부토압을 분산시켜 umbrella arch에는 거의 일정한 값의 수직응력이 작용하는 경향을 볼 수 있다. 이러한 경향으로 볼 때 umbrella arch는 상부토압을 분산시키고 동시에 터널에 작용하는 토압을 경감시키는 효과를 통해 터널의 안정성을 증대시킨다고 볼 수 있다.

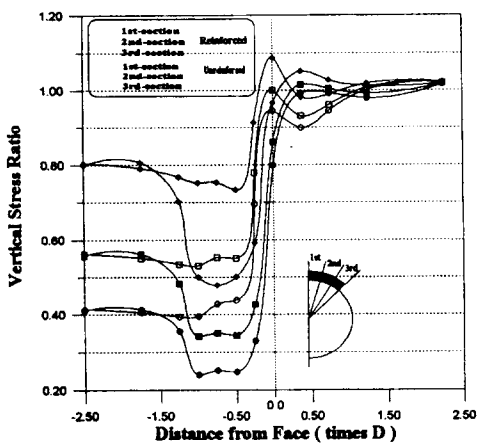


(a) Umbrella 내측

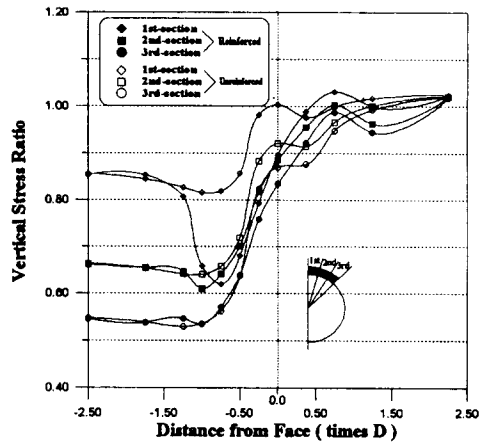


(b) Umbrella 외측

그림 7. 터널 주변 접선 및 방사 응력 분포 경향



(a) Umbrella 내측



(b) Umbrella 외측

그림 8. Umbrella Arch 내·외측에서의 수직응력 분포 경향

4. Umbrella Arch의 설계변수에 대한 매개변수 변환연구의 결과 및 분석

Umbrella arch공법은 공사비가 많이 소요되는 高價의 보조공법이므로 경제적인 설계가 선결 과제이며 이를 위해서는 대상지반 및 터널 조건에 적합한 최적의 보강조건을 결정하는 과정이 필수적이다. 본 연구에서는 umbrella arch 공법의 적용에 있어서 각 설계변수에 따른 보강효과를 고찰하기 위해 umbrella arch의 강성(E_w), 횡방향 보강 범위(R) 및 경사도(I) 등의 설계변수에 대한 매개변수 변환연구를 수행하고 그 결과를 분석하였다. 결과의 분석에 있어서는 보강된 경우의 침하량(u_r)을 보강되지 않은 경우의 침하량(u_{nr})으로 무차원화 시킨 침하비(settlement ratio, u_r/u_{nr})를 이용하였다. 매개변수 변화연구를 위해 수행된 해석 조건은 표 2에 나타나 있다.

표 2. 해석 조건

경사도, I (Degree)	보강 범위, R (Degree)	Umbrella Arch 강성 (E_w/E_s)
5, 15	90, 120, 180	10, 50, 100

Umbrella arch는 일반적으로 10' 내외의 종방향 수평 경사도를 유지하며 시공되는 것이 보통인데 일반적으로 경사도가 급할 경우 보강효과가 감소하는 것으로 알려져있다. Umbrella arch의 수평 경사도에 따른 침하 경감효과를 알아보기 위해 5' 와 15' 의 경사도로 시공된 경우에 대한 해석을 수행하고 그 결과를 고찰하였다. 그림 9는 경사도에 따른 침하비 변화 경향을 나타내고 있는데 보이는 바와 같이 경사도에 증가함에 따라 천단침하가 다소 증가하는 경향을 관찰 할 수 있으며, 지표보다는 천단에서의 차이가 더 뚜렷함을 알 수 있어 가능한 한 낮은 수평 경사도를 유지하며 umbrella arch를 시공하는 것이 보다 효율적인 보강효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

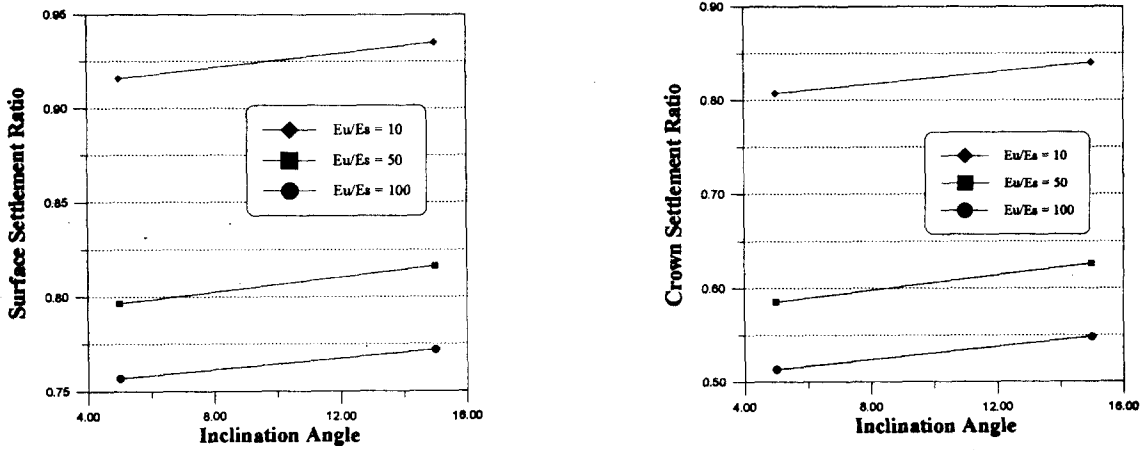


그림 9. 경사도에 따른 침하비 변화 경향

그림 10은 umbrella arch의 보강범위에 따른 지표 및 천단 침하 발생 경향을 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 보강범위에 따른 침하경감효과는 거의 선형관계를 보이고 있음을 알 수 있다. 천단침하의 경우 보강범위가 확대됨에 따라 현저히 억제되어 R=180' 의 경우 최대 약 45%까지 감소되는 경향을 관찰할 수 있다. 지표침하의 경우에는 umbrella의 강성이 작은 경우에는 뚜렷한 지표침하 억제 효과를 볼 수 없으나 강성이 커짐에 따라 보강범위에 따른 침하 억제 효과가 뚜렷해져 Eu/Es=100인 umbrella가 스프링 라인까지 보강된 180' 의 경우에는 약 23%의 지표 침하 억제 효과를 보이고 있다. 이러한 경향은 지표침하를 억제하기 위해 umbrella arch 공법을 적용할 경우 보강범위를 120' 로 경직되게 적용할 것이 아니라 일련의 종화 정도가 터널 스프링 라인 하부까지 깊게 전개되는 지반조건이 불량한 현장에서는 보강범위를 넓게 적용하는 것이 바람직함을 제시하고 있다. 또한 보강범위에 따른 침하경감 효과의 변화는 umbrella의 강성이 증가할 수록 더욱 뚜렷해지는 경향을 관찰할 수 있는데, 이러한 경향은 지반조건이 매우 열악하여 지반의 강성이 umbrella arch에 비해 매우 작은 지반에 umbrella arch가 시공될 경우 보강범위가 중요한 설계변수가 됨을 보여 주고 있다.

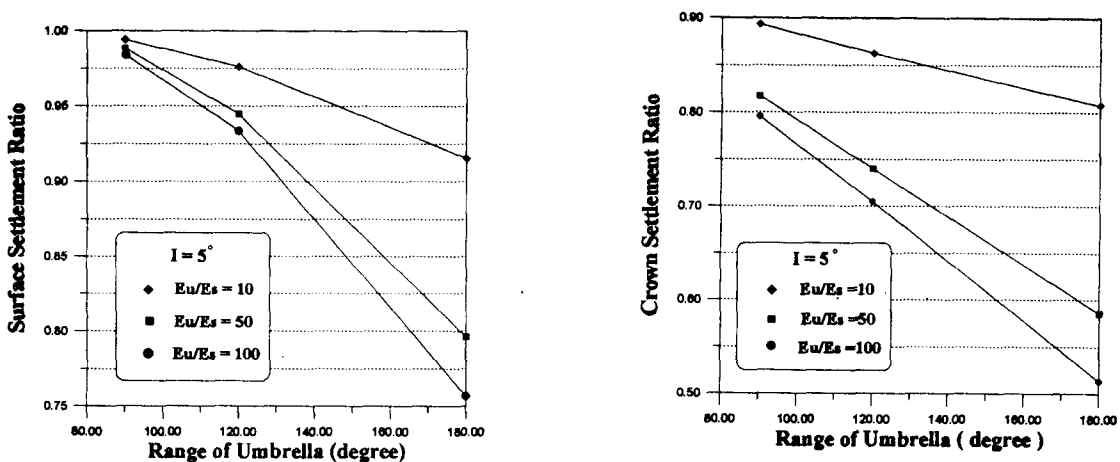


그림 10. Umbrella Arch의 보강범위에 따른 침하비 변화 경향

Umbrella arch 공법의 보강효과는 무엇보다도 시공되는 umbrella의 강성에 좌우된다. 강관 보강형 다단 그라우팅 공법의 경우 강관의 분리간격에 따라 umbrella의 강성이 결정되게 되는데 국내에서 적용되는 강관 보강형 다단 그라우팅 공법의 경우 강관 분리방법으로 설치되므로 강관의 분리간격이 중요한 설계요인이 된다. 강관의 최적간격은 최근까지 체계적인 연구가 수행되고 있지 않는 관계로 터널시공조건별로 제시되고 있지 않고 있으나 경험적으로 강관직경의 약 10~15배 정도를 취하는 것이 보통이며, 일본에서는 지반의 밀도, 입도분포, 함수비, 전단강도, 주입재의 주입범위에 따라 분리간격을 증감시켜 적용하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 umbrella arch를 일종의 합성재료로 모델링한 관계로 강관의 분리 간격을 직접적으로 고려할 수는 없으나 umbrella의 변형계수를 변화시키며 이에 따른 보강효과의 변화경향을 고찰하였다.

그림 11은 umbrella arch와 주변지반의 강성비(stiffness ratio, E_u/E_s)에 따른 지표 및 천단 침하 변화 경향을 보여 주고 있다. 보이는 바와 이 강성비와 보강효과는 직선적인 관계가 아닌 비선형적인 관계를 보임을 알 수 있는데 보강범위가 넓을 수록 강성비에 따른 보강효과가 현저해지는 경향을 관찰할 수 있으며, 또한 경사도가 낮을 수록 강성비에 따른 보강효과의 변화경향이 뚜렷해짐을 알 수 있다.

이러한 경향을 종합해 볼 때 보강효과는 한 설계변수와 비례적인 관계에 있는 것이 아니라 여러가지 설계변수의 복합적인 상관관계를 보이기 때문에 umbrella arch의 설계시에는 지반조건 및 umbrella arch의 경사도, 보강범위, 강성 등을 종합적으로 고려할 것으로 사료된다.

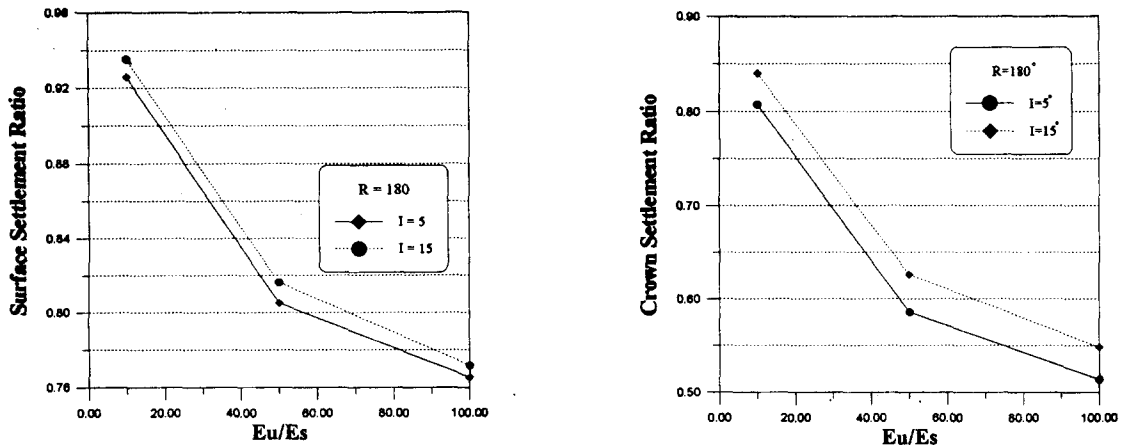


그림 11. Umbrella Arch의 강성에 따른 침하비 변화 경향

5. 결론

본 연구에서 수행된 umbrella arch 공법으로 보강된 터널의 거동에 관한 3차원 유한요소해석 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. Umbrella arch는 지표침하 보다는 터널 천단 침하 구속효과가 뛰어나다.
2. 지표 침하 억제 효과를 극대화 하기 위해서는 횡방향 보강범위를 기존의 120° 에 국한할 것이 아니라 터널 스프링 라인까지 확대 시키거나 추가적인 터널 측면부 보강대책이 필요하다.
3. Umbrella arch로 인한 종방향 beam 및 횡방향 arch 효과에 기인하여 터널주변의 접선응력 및 토압이 현저히 감소되어 터널의 안정성이 증대된다.
4. Umbrella arch의 수평 경사도가 작을 수록 침하 경감 효과가 증대하며 이러한 경향은 지표침하 보다는 천단침하에서 뚜렷해 진다.
5. 보강범위에 따른 침하경감 효과의 변화는 umbrella의 강성이 증가할 수록 더욱 뚜렷해지는데 이는 지반조건이 매우 열악하여 지반의 강성이 umbrella arch에 비해 매우 작은 지반에 umbrella arch가 시공될 경우 보강범위가 중요한 설계변수가 됨을 의미한다.

참고 문헌

1. 홍성환, 배규진 외 5인(1994), "강관보강형 다단 그라우팅 공법의 개발", (주) 지오텍엔지니어링
2. Borja, R. I., Lee, S. R., and Seed, R. B.(1989), "Numerical Simulation of Excavation in Elasto-Plastic Soils", *Int. J. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 13, pp 231- 249
3. Durand, J. P., Deffayet, M., Jassionnes, C., and Reith, J. L.(1994) "Surface settlement in urban tunnelling works: Design approach for Toulon underground motorway crossing", *Proc. of the 5th Int. Congress on Tunnelling and Ground Conditions*, Cairo, Egypt, pp. 97-104
4. Kotake, N., Yamamoto, Y., and Oka, K(1994) "Design for umbrella method based on numerical analyses and field", *Proc. of the 5th Int. Congress on Tunnelling and Ground Conditions*, Cairo, Egypt, pp. 501-508
5. Pelizza, S. and Pelia, D.(1993) "Soil and Rock Reinforcements in Tunnelling", *Tunnels and Underground Space Technology*, Vol 8, No. 3, pp. 357-372.