

## 복개 터널구조물의 역학적 거동 영향인자 분석을 위한 수치해석적 연구

### A Study on the Behavior of Cut and Cover Tunnel by Numerical Analysis

이규필<sup>1)</sup>, Gyu-Phil Lee, 이석원<sup>2)</sup>, Seok-Won Lee, 박시현<sup>2)</sup>, Si-Hyun Park, 배규진<sup>3)</sup>, Gyu-Jin Bae

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, Civil Engineering Div., KICT

<sup>2)</sup> 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Engineering Div., KICT

<sup>3)</sup> 한국건설기술연구원 토목연구부 연구위원, Senior Research Fellow, Civil Engineering. Div., KICT

**SYNOPSIS** : In the design of cut and cover tunnels, the structural analysis has been used for its simplicity. Contrarily to the geotechnical analysis, this technique could not account for the geological and geometric factors. In this study, the dominant factors influencing the behavior of cut and cover tunnel such as interface element, cut slope, distance between cut slope and tunnel lining, berm, coefficient of lateral earth pressure, were investigated and compared by geotechnical numerical analysis. Based on the results, the variations of earth pressure, bending moment, shear stress, axial load, and displacements were evaluated and analyzed for each factor.

**Key words** : Cut and cover tunnel, Numerical analysis, Bending moment, Shear force, Displacement

## 1. 서론

복개 터널구조물의 라이닝은 상재하중, 토압, 수압, 자중, 터널 내부의 건축하중, 온도변화 및 건조수축, 지진하중 등과 같은 다양한 현장조건 등을 고려하여 해석 및 설계를 수행하고 있다. 이러한 고려조건 가운데 복개 터널 라이닝에 작용하는 토압은 콘크리트 라이닝 완공 후 성토되는 성토체를 하중으로 산정하여 해석을 실시하는 구조공학적 모델링 기법이 널리 적용되고 있으나, 이러한 구조공학적 모델링 기법은 복개 터널 라이닝에 인접하여 시공되는 굴착사면의 경사 및 콘크리트 라이닝과 굴착사면의 이격거리(이하 이격거리), 굴착사면의 소단, 성토체 토층의 성토사면 구배 및 형상, 토피고 등과 같은 지형적인 영향인자와 Soil Arching, 콘크리트 라이닝과 성토체 접촉면의 경계요소 및 원지반의 측압 등과 같은 지반공학적 측면의 영향인자를 고려하기에 많은 어려움이 있다.

본 연구에서는 복개 터널구조물의 합리적인 경제적 설계를 위한 기본연구로써, 좁은 되메움 공간에서의 토압경감과 콘크리트 라이닝과 성토체의 상호작용을 고려하기 위하여 지반공학적 모델링 기법을 이용하였다. 또한 복개 터널구조물의 역학적 거동 영향인자로서 굴착사면의 경사 및 콘크리트 라이닝과 굴착사면의 이격거리, 굴착사면의 소단, 콘크리트 라이닝과 성토체 접촉면 경계요소 및 원지반의 측압 등을 고려하였으며, 각 영향인자가 복개 터널구조물의 역학적 거동에 영향을 미치는 정도를 분석하였다. 일반적으로 성토체는 원지반의 지형조건을 복원 등을 목적으로 일정 구배를 갖도록 설계 및 시공하며, 이로 인하여 콘크리트 라이닝에 편토압이 작용하게 되어 복개 터널구조물의 거동에 영향을 미치게 된다. 따라서 편토압의 영향 검토를 위한 수치해석을 수행하였으나, 본 논문에서는 요약 정리하지 않았다.

본 연구수행을 위하여 지반공학적 모델링 기법을 이용한 수치해석은 현재 유럽과 동남아시아 등지에서 가시철 흙막이 구조물, 연약지반, 성토 및 성토사면 안정, 쉘드터널 등과 같은 지반공학관련 제반 문제 해결을 위하여 널리 적용되고 있는 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS(네덜란드 PLAXIS社, Ver. 7.2)를 이용하였다.

## 2. 수치해석 조건 및 입력 Parameters

### 2.1 수치해석 조건

수치해석을 위한 기본 단면은 2차선 도로터널 단면을 선정하였으며, 콘크리트 라이닝은 Beam요소, 지반요소는 2차원 평면 변형률 요소(Plane Strain Element)로 모델링하였다. 수치해석시 상재하중, 수압, 터널 내부의 건축하중, 온도변화 및 건조수축, 지진하중 등은 고려하지 않았다.

복개 터널은 시공방법상 단계 성토가 진행되며, 성토체와 콘크리트 라이닝의 상호작용이 수반되는 일련의 과정을 수치해석적으로 모사하기 위하여 터널 축에 연직인 평면단면을 고려하였으며, 성토체의 토압작용 메커니즘을 보다 정확하게 규명하기 위하여, 콘크리트 라이닝과 성토체 접촉면에 경계요소를 모델링하여 경계면에서 발생하는 마찰력을 고려하였다.

수치해석 결과 분석을 위한 콘크리트 라이닝의 모델링 절점번호는 그림 1과 같고, 콘크리트 라이닝에 발생하는 단면력 및 변위의 부호규약은 표 1과 같다.

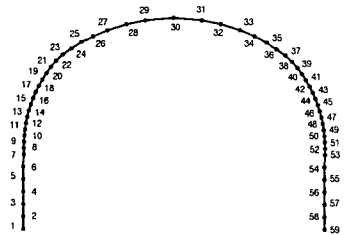



그림 1. 콘크리트 라이닝절점번호

표 1. 부호규약

휨모멘트	축력	수평변위	연직변위
(-) 	압축 : + 인장 : -	→ : + ← : -	↑ : + ↓ : -

### 2.2 수치해석을 위한 지반정수

복개 터널 라이닝의 설계를 위한 원지반의 강도정수는 원위치 시험 등을 통하여 합리적인 값을 산정하여야 하며, 이러한 강도정수는 현장의 지질공학적 특성에 따라 넓은 범위를 보이게 된다. 본 연구에서는 수치해석을 위한 기본 입력물성치 산정을 위하여 1998년 한국건설기술연구원에서 수행한 “국내 터널 설계 기술력 향상을 위한 신기술 연구(I)”의 조사결과를 토대로 하여 원지반 지반정수를 산정하였다.

또한 복개 터널 라이닝의 시공시 성토체의 지반정수는 성토시 다짐도 및 성토체의 심도변화 등에 따라 변화하며, 수치해석시 상기 특성을 고려하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서, 성토체의 지반정수 산정을 위하여 동일 조건에 대하여 현재 복개 터널 라이닝의 해석에 널리 적용되고 있는 구조공학적 해석 기법 및 지반공학적 모델링 기법을 이용한 수치해석을 실시하고, 두 해석기법에 의한 콘크리트 라이닝에 발생하는 변위 및 단면력 등을 비교하여 유사한 결과를 보이는 성토체 지반정수 산정을 위한 Parametric Study를 수행하였다. 복개 터널 라이닝의 거동 분석 및 영향인자 분석을 위한 지반 조건별 지반정수를 정리하면 표 2와 같다.

표 2. 수치해석을 위한 지반 조건별 입력물성치

		단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	탄성계수 (kN/m <sup>2</sup> )	포아송비	점착력 (kN/m <sup>2</sup> )	내부마찰각 (°)	K <sub>0</sub>
성토체		19	3.5×10 <sup>4</sup>	0.35	10	30	1 - sin φ
원 지 반	풍화암	23	3.9×10 <sup>5</sup>	0.30	184	33	0.5
	연 암	25	2.1×10 <sup>6</sup>	0.27	930	37	1.0
	경 암	27	1.9×10 <sup>7</sup>	0.23	1400	43	1.0

### 3. 영향인자 분석을 위한 수치해석

본 연구에서는 복개 터널구조물의 역학적 거동 영향인자 분석을 위하여, 그림 2에서 보이는 바와 같이 각 영향인자의 조건을 변화시켜 수치해석을 실시하였으며, 굴착사면 구배 및 복개 터널 라이닝과 굴착사면 이격거리는 각 조건을 조합한 조건에 대하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 위한 대상 단면은 2차선 도로터널을 기준으로 하였으며, 천단부 상부 성토고는 2D까지(D : 등가환산직경) 모델링하였다(그림 3 참조). 각 영향인자별 해석조건 등을 정리하면 다음과 같다.

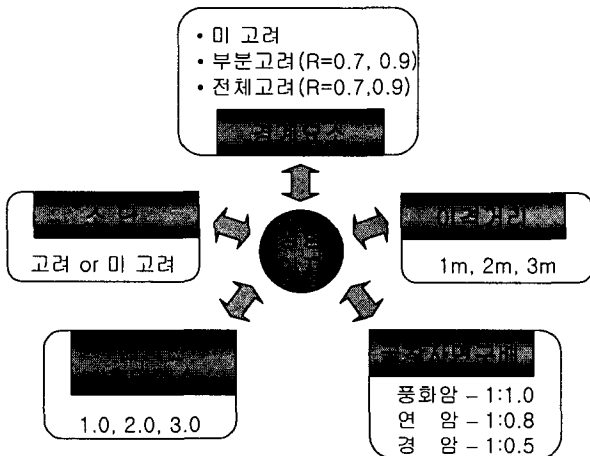


그림 2. 영향인자 분석을 위한 수치해석조건

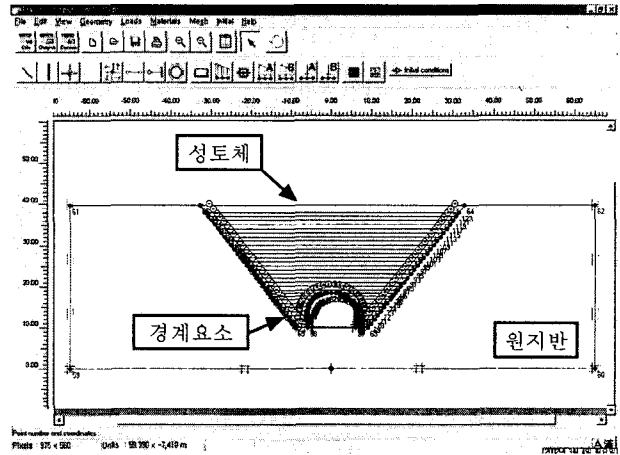


그림 3. 수치해석 모델링

#### ▶ 경계요소(Interface Element)

경계요소의 모델링은 식 (1) 및 (2)에서 보이는 바와 같이 지반조건과 접촉매질의 종류에 따라 강도정수( $c, \phi$ )에 일정한 계수( $R$ )를 이용하여 경계요소를 모델링하는 방법을 적용하였다. 경계요소의 모델링을 위한 계수는 표 3에서 보이는 바와 같이 지반의 종류 및 흙과 접하게 되는 대상 구조물의 재질에 따라 그 값이 변화하는 것으로 제안되고 있다.

본 연구에서는 경계요소 모델링이 복개 터널구조물에 미치는 영향을 분석하기 위하여 경계요소를 고려하지 않은 경우, 콘크리트 라이닝과 성토체 접촉면에 경계요소를 고려한 경우, 콘크리트 라이닝 및 굴착사면과 성토체 접촉면에 경계요소를 고려한 경우 각각  $R=0.7$  및  $R=0.9$  등 5가지 해석조건에 대하여 수치해석을 실시하였다(표 4 참조).

$$C_{interface\ element} = R \cdot C_{soil} \quad (1)$$

$$\tan \phi_{interface\ element} = R \cdot \tan \phi_{soil} \quad (2)$$

여기서,  $C_{interface\ element}$  : 경계요소의 점착력

$C_{soil}$  : 경계요소와 접하는 흙의 점착력

$\phi_{interface\ element}$  : 경계요소의 내부마찰각

$\phi_{soil}$  : 경계요소와 접하는 흙의 내부마찰각

$R$  : 계수

표 3. 경계요소의 범위

지반의 종류	대상 구조물의 재질	R	지반의 종류	대상 구조물의 재질	R
sand	steel	$\frac{2}{3}$	clay	steel	0.5
	concrete	0.8~1.0		concrete	0.7~1.0

표 4. 해석조건별 경계요소 및 계수의 적용 조건

경계요소 적용 여부 및 적용범위	R
경계요소 고려 안 함	-
콘크리트 라이닝과 성토체 접촉면에 경계요소 고려	0.7, 0.9
콘크리트 라이닝 및 굴착사면과 성토체 접촉면에 경계요소 고려	0.7, 0.9

▶ 굴착사면 구배 및 이격거리

콘크리트 라이닝 인근에 위치하는 굴착사면의 구배 변화가 복개 터널구조물에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 굴착사면의 구배는 그림 4에서 보이는 바와 같이 원지반 조건이 풍화암의 경우 사면구배 1:1, 연암 1:0.8, 경암 1:0.5로 가정하였으며, 굴착사면과 콘크리트 라이닝 하부의 이격거리를 1m, 2m, 3m로 각각 변화시켜 동일한 이격거리 조건에서 굴착사면의 구배 변화에 의한 영향을 검토하였다.

수치해석시 콘크리트 라이닝과 성토체의 접촉면 및 굴착사면과 성토체의 접촉면에는 경계요소를 고려하였으며, 경계요소 모델링을 위한 계수(R)는 콘크리트와 모래의 접촉면 고려시 0.8~1.0의 계수 범위 내에서 중앙값인 0.9로 가정하였다.

▶ 원지반 축압계수

터널 설계시 원지반의 초기응력은 현장에서 직접 측정하는 경우 대상 지반의 축압계수는  $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$ 의 관계를 이용한 결정방법 이외에 가정 및 유사 지반자료를 이용하거나, 포아송비 또는 경험식 등을 이용하여 설계에 적용하고 있으며, 또한 암반의 종류(풍화토, 풍화암, 연암, 경암)와 터널의 시공위치(도심지 또는 산악)에 따라 넓은 범위의 값이 적용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 굴착사면 원지반의 축압계수 변화가 복개 터널구조물에 미치는 영향을 분석하기 위하여 원지반의 축압계수를 1.0~3.0으로 변화시켜 수치해석을 실시하였다. 수치해석 대상단면 형상은 굴착사면의 구배 1:0.8, 콘크리트 라이닝과 굴착사면의 이격거리 3m로 굴착사면의 구배변화 및 소단 등은 고려하지 않았으며, 콘크리트 라이닝 및 굴착사면과 성토체의 접촉면에 경계요소를 모델링하였다(R=0.9).

▶ 소단

굴착사면 시공시에는 현장의 원지반 조건에 따라 일정 간격으로 소단을 설치하고 있다. 따라서 본 연구에서는 복개 터널구조물 시공시 콘크리트 라이닝의 거동에 영향을 미치는 요소로써 소단의 유·무에 따른 콘크리트 라이닝의 단면력 및 변위 등에 대하여 검토를 수행하였으며, 소단의 고려 유·무에 의한 영향 검토를 위한 수치해석 조건은 다음과 같다.

원지반은 풍화암, 연암, 경암으로 가정하였으며, 각 암질별 굴착사면의 구배는 경암 1:0.5, 연암 1:0.8, 풍화암 1:1.0으로 모사하였다. 암질 구성조건은 라이닝 천단부까지 경암, 콘크리트 라이닝 천단부부터 1.0D 지점까지 연암, 그 상부는 풍화암으로 구성되어 있는 조건으로 가정하였으며, 콘크리트 라이닝과 굴착사면의 이격거리 3m, 콘크리트 라이닝 천단부 성토고 2.0D로 가정하였다. 소단은 각 암질변화 및 굴착사면 구배 변화지점에 소단은 폭 1m로 모사하였으며, 콘크리트 라이닝 및 굴착사면과 성토체의 접촉면에 경계요소(R=0.9)를 고려하였다(그림 5 참조).

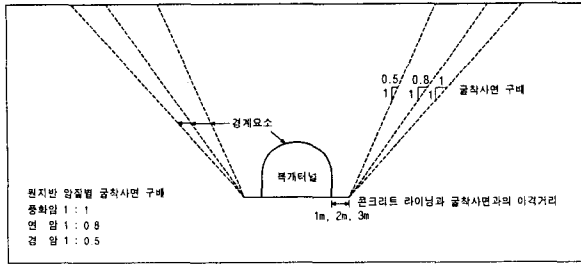


그림 4. 굴착사면 변화 영향 검토를 위한 수치해석 개념도

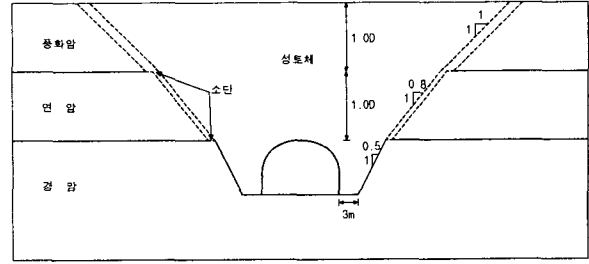


그림 5. 소단 영향 검토를 위한 수치해석 모델링

## 4. 결과 분석

복개 터널구조물의 거동에 영향을 미치는 영향인자로서 굴착사면의 구배변화 및 이격거리 변화, 경계요소, 원지반 축압계수 및 소단 유·무 등에 의한 영향 검토를 위하여 다양한 조건에 대하여 수치해석을 수행하였으며, 해석결과를 정리하면 다음과 같다.

### 4.1 영향인자별 결과분석

복개 터널구조물의 영향인자 분석을 위하여 본 연구에서는 각 영향인자별 해석조건 가운데 최대 성토량 조건을 기준으로 영향인자 변화에 따른 최대 단면력 및 최대 변위의 변화관계를 분석하였으며, 그 내용을 정리하면 표 5와 같다.

#### ▶ 경계요소(Interface Element)

경계요소를 고려하는 경우 콘크리트 라이닝에 발생하는 단면력 및 변위는 감소하는 것으로 나타났으며, 동일한 부분에 경계요소를 고려한 경우 계수(R)값이 감소함에 따라 단면력 및 변위 또한 감소하는 것으로 나타났다. 또한 경계요소 고려부분이 확대된 경우 즉, 콘크리트 라이닝 및 굴착사면과 성토체의 접촉부분에 경계요소를 고려하는 경우 단면력 및 변위가 크게 변화하는 것으로 나타났다. 콘크리트 라이닝 및 굴착사면과 성토체의 접촉면에 경계요소를 고려하여 수치해석을 실시한 결과, 경계요소의 전단 변형으로 인하여 굴착사면과 성토체의 주응력은 불연속면이 존재하게 되며, 또한 성토체 내부의 Soil Arching 효과 등으로 인하여 콘크리트 라이닝 천단부 주변 성토체 내부에 전단력이 증가하는 것으로 나타났다(그림 6 참조).

#### ▶ 굴착사면 구배 및 이격거리

복개 터널구조물의 거동에 영향인자로서 굴착사면의 구배변화 및 이격거리 변화에 의한 영향 검토를 정리하면 다음과 같다. 굴착사면의 구배가 1:0.5 및 1:0.8인 경우 이격거리가 증가하게 되면 성토량이 증가하고, 이로 인하여 콘크리트 라이닝에 작용하는 토압 등이 증가하게 되어 단면력 및 변위가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 굴착사면의 구배가 1:1인 경우는 이격거리가 증가함에 따라 단면력과 변위는 감소하는 상반되는 결과를 보이는 것으로 나타났다. 이는 굴착사면의 구배가 1:0.5에서 1:1로 경사도가 낮아짐에 따라 굴착사면과 성토체의 접촉면에서 발휘될 수 있는 전단력의 작용 메카니즘의 변화에 기인한 것으로 판단된다. 즉, 굴착사면 구배가 1:0.5 및 1:0.8인 경우 이격거리에 관계없이 굴착사면과 성토체의 접촉면에 발생하는 전단응력이 경계요소의 전단강도를 초과하게 되며, 이로 인하여 전 성토하중이 터널에 작용되는 것으로 판단되나, 구배가 1:1인 경우 이격거리가 증가할수록 접촉면의 전단저항이 발휘되어 어느정도 하중을 지지하는 아칭효과가 발휘되는 것으로 판단되며, 이에 대한 추가적인 연구를 수행할 계획이다.

▶ 원지반 축압계수 및 소단

콘크리트 라이닝에 발생하는 단면력 가운데 축압계수 변화에 따라 최대 휨모멘트는 약 2%~4% 정도 변화하며, 최대 전단력의 변화율은 약 1%~2%, 최대 축력은 약 0.01%~0.02% 정도 변화하는 것으로 나타났으며, 소단의 유·무에 따라 최대 휨모멘트는 약 0.4% 정도 변화하며, 최대 전단력은 약 0.06%, 최대 축력은 약 0.9% 정도 변화하는 것으로 나타났다. 따라서 축압계수의 변화 및 소단의 유·무 조건에 따라 휨모멘트가 가장 큰 영향을 받는 것으로 판단되나, 그 영향은 매우 작은 것으로 나타나 축압계수의 변화 및 소단의 영향은 무시할 수 있는 것으로 판단된다.

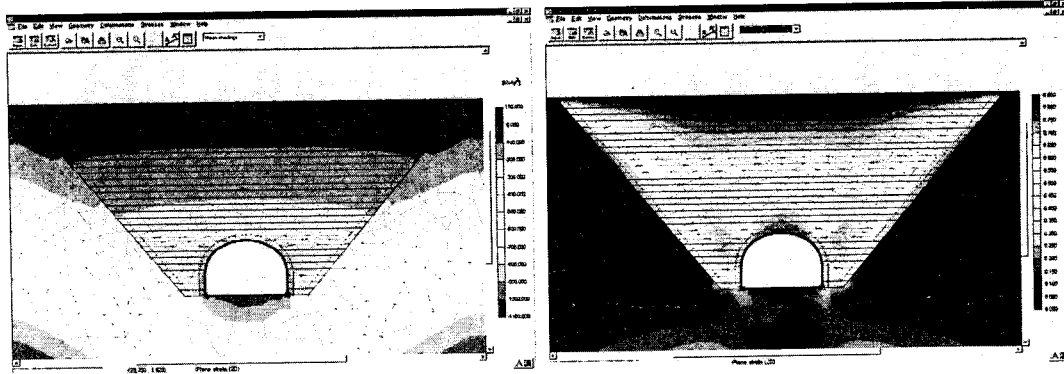
표 5. 영향인자 변화에 따른 단면력 및 변위 변화관계

(감소율 : %)

구 분		휨모멘트 (kN-m)		전단력 (kN)		축력 (kN)		수평변위 (mm)		연직변위 (mm)	
		최대값	감소율	최대값	감소율	최대값	감소율	최대값	감소율	최대값	감소율
이격거리 1m	1:0.5	1264.3	12.5	787.5	13.3	2860.8	19.5	-3.4	19	-7.3	15.1
	1:0.8	1310.3	8.1	830.6	8.6	3243.8	8.7	-3.7	11.9	-7.8	9.3
	1:1.0	1424.5	-	908.3	-	3551.9	-	-4.2	-	-8.6	-
이격거리 2m	1:0.5	1280.5	9.7	814.1	10.2	3040.7	16.1	-3.5	14.6	-7.5	12.8
	1:0.8	1241.9	12.5	821.7	9.4	3222.6	11.1	-3.3	19.5	-7.4	14
	1:1.0	1418.6	-	906.7	-	3625.5	-	-4.1	-	-8.6	-
이격거리 3m	1:0.5	1302.6	5.2	820.3	9.5	3181.5	10.8	-3.5	7.9	-7.6	8.4
	1:0.8	1304.5	5.1	857.4	5.4	3460.1	3	-3.6	5.3	-7.8	6
	1:1.0	1374.4	-	906.3	-	3568.0	-	-3.8	-	-8.3	-
굴착사면 구 배 1:0.5	1m	1264.3	2.9	787.5	4	2860.8	10.1	-3.4	2.9	-7.3	4
	2m	1280.5	1.7	814.1	0.8	3040.7	4.4	-3.5	0	-7.5	1.3
	3m	1302.6	-	820.3	-	3181.5	-	-3.5	-	-7.6	-
굴착사면 구 배 1:0.8	1m	1310.3	0.4 <sup>(증)</sup>	830.6	3.1	3243.8	6.3	-3.7	3.8 <sup>(증)</sup>	-7.8	0
	2m	1241.9	4.8	821.7	4.1	3222.6	6.9	-3.3	8.3	-7.4	5.1
	3m	1304.5	-	857.4	-	3460.1	-	-3.6	-	-7.8	-
굴착사면 구 배 1:1.0	1m	1424.5	3.6 <sup>(증)</sup>	908.3	0.2 <sup>(증)</sup>	3551.9	0.5	-4.2	10.5 <sup>(증)</sup>	-8.6	3.6 <sup>(증)</sup>
	2m	1418.6	3.2 <sup>(증)</sup>	906.7	0	3625.5	1 <sup>(증)</sup>	-4.1	7.9 <sup>(증)</sup>	-8.6	3.6 <sup>(증)</sup>
	3m	1374.4	-	906.3	-	3568.0	-	-3.8	-	-8.3	-
경 계 요 소	미고려시	1337.4	-	860.4	-	3601.3	-	-3.77	-	-7.96	-
	부분고려시 (R=0.9)	1319.8	1.4	861.9	0.1 <sup>(증)</sup>	3392.5	5.8	-3.71	1.6	-7.95	0.1
	부분고려시 (R=0.7)	1316.7	1.5	836.5	2.7	2958.9	17.8	-3.6	4.5	-7.77	2.4
	R=0.9	1304.5	2.5	857.4	0.4	3460.1	4	-3.65	3.2	-7.79	2.1
	R=0.7	1218.5	8.9	819.5	4.8	3236.7	10.2	-3.2	15.1	-7.32	8
원 지 반 축압계수	1.0	1304.5	-	857.4	-	3460.1	-	-3.6	-	-7.8	-
	2.0	1329.5	1.9 <sup>(증)</sup>	865.7	1 <sup>(증)</sup>	3459.8	0.01 <sup>(증)</sup>	-3.8	5 <sup>(증)</sup>	-8.0	2.3 <sup>(증)</sup>
	3.0	1356.7	4 <sup>(증)</sup>	874.7	2 <sup>(증)</sup>	3459.5	0.02 <sup>(증)</sup>	-3.9	9.7 <sup>(증)</sup>	-8.2	4.7 <sup>(증)</sup>
소 단	미 고려시	1299.1	-	834	-	3318.3	-	-3.48	-	-7.65	-
	고려시	1293.9	0.4	834.5	0.06 <sup>(증)</sup>	3287.4	0.9	-3.52	1.1 <sup>(증)</sup>	-7.66	0.1 <sup>(증)</sup>

※ - : 각 영향인자 조건변화에 따른 영향 검토를 위한 기준

(증) : 영향인자 조건 변화시 단면력 및 변위 증가



(a) 주응력도 (b) 전단력 분포도  
 그림 6. 경계요소 고려시 성토체 내부 주응력도 및 전단력 분포도

#### 4.2 성토량과 최대 단면력 및 최대 변위 상관관계 분석

수치해석결과 콘크리트 라이닝에 발생하는 단면력 및 변위는 성토량의 증가와 비례적인 관계로 변화하는 것으로 나타났다. 따라서, 성토량변화에 따른 단면력과 변위의 변화정도 및 상관성 분석을 통하여 단면력과 변위 가운데 성토량 변화에 가장 큰 영향을 받는 요소를 파악하였으며, 그 내용을 정리하면 다음과 같다.

수치해석 조건 가운데 성토량과 콘크리트 라이닝의 단면력 및 변위의 경향 분석을 위하여 경계요소 고려를 위한 계수(R)가 0.9이고 경계요소를 콘크리트 라이닝 및 굴착사면과 성토체의 접촉면에 모델링한 경우에 대하여 성토량과 콘크리트 라이닝에 발생하는 최대 단면력 및 최대 변위의 상관관계를 분석하면 그림 7 및 8과 같다.

성토량 증가에 따른 단면력의 변화 경향은 축력이 가장 큰 영향을 받아 변화하는 것으로 나타났으며, 연직변위가 수평변위보다 성토량 증가에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 콘크리트 라이닝에 발생하는 단면력 가운데 성토량과 휨모멘트의 상관계수는 0.536, 전단력과 상관계수는 0.801, 축력과 상관계수는 0.925, 콘크리트 라이닝에 발생하는 수평변위와 성토량의 상관계수는 0.43, 연직변위와 성토량의 상관계수는 0.635로 축력 및 전단력은 성토량과 비교적 높은 상관관계를 보이며, 휨모멘트와 변위는 성토량과의 상관성이 낮은 것으로 나타났다. 따라서 콘크리트 라이닝의 단면력 가운데 축력 및 전단력은 성토량에 큰 영향을 받으며, 휨모멘트와 변위는 성토량에 의한 영향뿐만 아니라 굴착사면구배, 이격거리 등과 같은 지형적인 측면의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

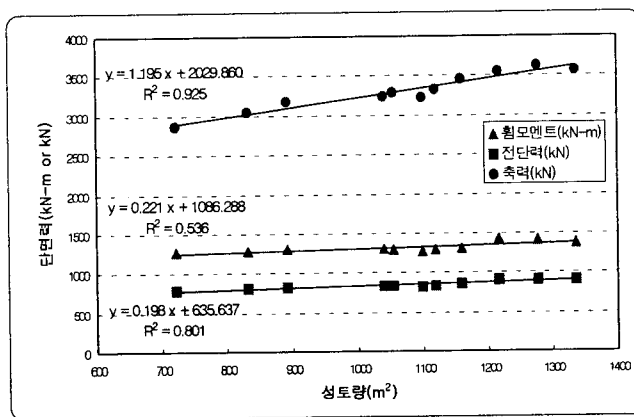


그림 7. 성토량과 단면력 상관관계

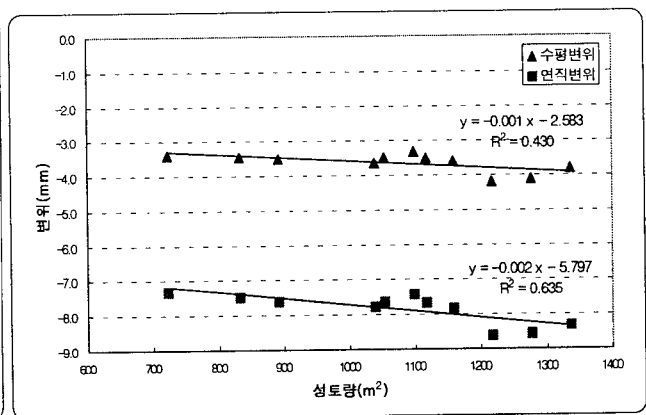


그림 8. 성토량과 변위 상관관계

## 5. 결론

본 연구에서는 상기 영향인자에 의한 복개 터널 라이닝 시공시 성토에 따른 모멘트, 전단력 및 축력 등과 같은 부재력과 수평방향 변위 및 연직방향 변위 등과 같은 복개 터널의 기본거동 분석 및 영향인자분석 등을 수행하기 위하여 지반공학적 모델링 기법을 이용한 수치해석을 실시하였다. 수치해석 기법을 이용한 복개 터널구조물의 역학적 거동 분석을 통한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 콘크리트 라이닝 및 굴착사면과 성토체의 접촉면에 경계요소를 고려하여본 결과, 경계요소의 전단 변형으로 인하여 굴착사면과 성토체의 주응력은 불연속면이 존재하게 되며, 또한 성토체 내부의 Soil Arching 효과 등으로 인하여 콘크리트 라이닝 천단부 주변 성토체 내부에 전단력이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 경계요소의 고려 여부는 상대적으로 해석결과에 큰 영향을 미치지 않으나, 복개 터널 구조물 시공시 Soil Arching 등을 고려하기 위해서는 반드시 필요한 합리적인 모델링이라고 판단된다.

(2) 이격거리가 동일한 조건에서 굴착사면의 구배 변화에 따른 단면력 및 변위의 변화 관계를 연구하여 본 결과, 콘크리트 라이닝에 작용하는 수평토압 및 연직토압의 경우 이격거리가 1m와 3m인 경우에는 굴착사면 구배가 증가하여 즉, 경사가 완만해짐에 따라 성토량이 증가하여 두 토압이 모두 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 이격거리가 2m인 경우 콘크리트 라이닝에 작용하는 수평토압은 굴착사면 구배가 1:0.8일 때 가장 크게 작용하여, 콘크리트 라이닝의 횡방향 거동의 구속효과로 인하여 변위가 감소하고, 따라서 휨모멘트 및 전단력이 감소하는 것으로 판단된다. 특히 휨모멘트 및 변위의 감소가 크게 나타났다. 따라서 복개 터널구조물의 거동은 성토량 뿐만 아니라 현장 조건 등과 같은 주변 지형적인 인자에 영향을 받는 것으로 판단된다.

(3) 복개 터널구조물의 영향인자로서 굴착사면의 구배 및 이격거리 변화에 의한 영향을 연구하여 본 결과, 굴착사면의 구배가 1:0.5 및 1:0.8인 경우 이격거리가 증가하게 되면 성토량이 증가하고, 이로 인하여 콘크리트 라이닝에 작용하는 토압 등이 증가하게 되어 단면력 및 변위가 증가하는 것으로 나타났으나, 굴착사면의 구배가 1:1인 경우는 이격거리가 증가함에 따라 단면력과 변위는 감소하는 상반되는 결과를 보이는 것으로 나타났다. 이는 굴착사면의 구배가 1:0.5에서 1:1로 경사도가 낮아짐에 따라 굴착사면과 성토체의 접촉면에서 발휘될 수 있는 전단력의 작용 메커니즘의 변화에 기인한 것으로 판단된다.

(4) 본 연구에서는 영향인자별 비교·분석을 위한 경계요소 적용 부분 및 계수(R)가 동일한 경우에 대하여, 성토량과 단면력 및 변위의 상관관계를 분석하여 본 결과, 단면력 가운데 축력이 성토량과의 상관관계가  $R^2=0.925$ 로 가장 높은 상관성이 있는 것으로 나타났으며, 따라서 성토량 변화에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 콘크리트 라이닝의 수평변위보다 연직변위가 성토량과 보다 높은 상관성을 보이며, 성토량변화에 영향이 큰 것으로 나타났다.

(5) 복개 터널구조물의 거동에 영향을 미치는 영향인자로서 원지반 축압계수와 소단의 영향을 검토하여 본 결과, 다른 영향인자와 비교하여 상대적으로 미소하게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. 유건선 (2001), “굴착경사가 개착식터널의 구조적거동에 미치는 영향에 관한 연구”, 한국지반공학회는 논문집, 제 17권, 제 6호, pp. 245~253.
2. 김은섭, 이상덕 (1999), “지하 박스구조물에 작용하는 토압에 관한 실험적 연구”, 한국지반공학회는논문집, 제 15권, 제 4호, pp. 235~246.
3. C. Gary Kellogg (1993), “Vertical Earth Loads on Buried Engineered Works”, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No. 3, pp. 487~506.