

# 아치형 복개 터널구조물에 발생하는 토압에 영향을 미치는 설계변수들에 대한 민감도 분석

## Sensitivity analysis of design parameters influencing earth pressure acting on an arch-shaped cut and cover tunnel

배규진\*<sup>1</sup>, 정형식<sup>2</sup>, 이규필<sup>3</sup>

Bae, Gyu-Jin · Chung, Hyung-Sik · Lee, Gyu-Phil

### Abstract

To investigate major influencing factors on earth pressure acting on an arch-shaped cut and cover tunnel, Monte Carlo simulation based quantitative sensitivity analysis was carried out for mechanical properties of ground as well as excavation configuration-related design factors. From the sensitivity analysis, it was intended that effects of earth pressures from different influencing factors on a cut and cover tunnel should be numerically identified. Output factors used in the sensitivity analysis such as vertical and horizontal earth pressures at different tunnel positions were obtained from the finite element analysis. In this study, it was revealed that depending upon positions where horizontal as well as vertical earth pressures were acting, they were differently influenced by the same input factors. In addition, earth pressures acting on a cut and cover tunnel depended mainly on the embankment at crown and the inclination of cut slope.

**Keywords:** Cut and cover tunnel, sensitivity analysis, monte carlo simulation, earth pressure

### 요 지

본 연구에서는 아치형 복개 터널구조물에 작용하는 토압에 영향을 미치는 주요 영향인자들을 평가하기 위하여, 지반정수 및 굴착과 관련된 영향인자들에 대하여 몬테카를로 시뮬레이션 기법에 근거한 정량적 민감도 분석을 수행하였으며, 민감도 분석을 토대로 최대 영향인자 변화에 따른 토압의 변화에 대한 수치해석적 검토를 수행하였다. 민감도분석에 사용되는 출력결과들은 유한요소해석에서 얻어진 터널 위치별 연직 및 수평토압을 대상으로 하였다. 민감도 분석결과, 아치형 복개 터널구조물에 작용하는 수평 및 연직토압은 작용위치에 따라 동일한 영향인자에 대한 민감도가 상이한 것으로 나타났으며, 또한 최대 영향인자인 토피고 및 굴착사면 변화에 따라 아치형 복개 터널구조물에 작용하는 토압분포 및 크기가 변화하는 것으로 나타났다.

**주요어:** 복개 터널구조물, 민감도분석, 몬테카를로 시뮬레이션, 토압

\*1 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구부 연구부장(gjbae@kict.re.kr)

2 정희원, 한양대학교 토목공학과 교수

3 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원, 한양대학교 토목공학과 박사과정

## 1. 서론

우리나라는 산지가 68% 이상을 차지하고 있기 때문에 도로나 철도를 신설할 때 터널로 시공하기 어려운 구간에서 대절토 사면구간이 필연적으로 발생하게 된다. 이러한 대절토 사면이 존재하는 도로나 철도는 현지의 묘소, 기존 횡단도로, 개인 소유지 등을 훼손시킬 수 있고 인접마을의 주민과 야생동물의 왕래를 막을 수 있어 현재 많은 민원이 공사현장에서 발생하고 있다. 또한 도로나 철도 건설이 완료된 후에도 우기시 사면의 붕괴, 붕락이 자주 발생하여 교통을 마비시키는 등의 문제가 잇따르고 있어 절토사면에 대한 근본적인 대책마련이 요구되고 있다. 최근 이러한 문제해결을 위하여 우리나라에서는 지방도로, 철도, 고속철도 건설을 중심으로 절토사면구간에 대해 환경친화적인 복개 터널구조물을 시공하는 사례가 급증하고 있다. 또한 지반조건, 성토고 등의 한계로 인해 터널공법으로 굴착이 어렵거나, 영구사면의 형성으로 인한 산림훼손, 사유지 침범, 붕괴가 우려되고 국립·도립공원 인접 지역 등 환경 친화적인 공사구간에서 최근 많은 복개 터널구조물이 설계·시공되고 있다.

지반굴착 후 콘크리트 라이닝을 타설하고 원지반 형태로 되메움을 실시하는 복개 터널구조물에서 콘크리트 라이닝은 상재하중, 토압, 수압, 자중, 터널 내부의 건축하중, 온도변화 및 건조수축, 지진하중 등과 같은 다양한 현장조건 등을 고려하여 해석 및 설계를 수행하고 있다. 상기와 같은 고려사항 가운데 복개 터널구조물에 작용하는 토압은 콘크리트 라이닝 완공 후 성토체를 하중으로 가정하여 해석을 실시하는 구조공학적 모델링 기법이 널리 적용되고 있다. 그러나 이러한 구조공학적 모델링 기법은 복개 터널구조물에 인접하여 시공되는 굴착사면의 경사, 콘크리트 라이닝과 굴착사면의 굴착 폭 및 천단부 토피고 등과 같은 지형적인 인자와 soil arching, 콘크리트 라이닝과 성토체 접촉면의 경계요소 (interface element) 등과 같은 지반공학적 측면의 영향인자를 고려하기에 많은 어려움이 있다 (배규진 & 이규필 2001).

고랑형상으로 좁게 굴착된 공간에 대한 되메움 토압은 기존의 Rankine 및 Coulomb 등의 고전적 토압을 적용하기에는 그 경계조건이 달라 사용하기에 적합하지 않다. 일반적으로 좁게 굴착된 조건에서의 되메움 토압은

되메움 흙의 자중보다 그 크기가 작으며 그 분포형태는 정수압적인 선형분포가 아니라 원지반이 굴착된 사면과 되메움 흙사이의 벽면마찰 및 굴착공간의 크기 등의 영향으로 인하여 비선형적 분포를 보이는 것으로 알려져 있다.

고랑형상으로 좁게 굴착된 공간에서의 되메움 토압에 대한 연구는 Janssen (1895)의 사일로 이론을 확장 해석한 Marston (1913), Spangler (1983), Spangler와 Handy (1982) 등의 연구가 널리 알려져 있다. Handy (1985)는 이러한 조건에서의 되메움 토압을 되메움 흙이 함몰되어 보이는 평면아치 형태에 주목하여 최소주응력의 궤적을 연결하는 최소주응력 아치로서 밝힌 바 있으며, 기존의 Marston (1913), Spangler (1938) 등이 채택한 Rankine의 토압계수  $K_a$ 의 이론적 오류를 지적하고 이를 수정 제안하였다. 또한, Kellogg (1993)는 굴착벽면이 수직인 경우에 대한 기존의 좁은 공간에서의 되메움에 의한 토압이론을 수정하여 굴착면이 경사진 경우에 굴착 벽면에서 작용하는 주응력 방향의 변화에 따른 수평응력비를 제안하였으며, Handy (1985)는 최소주응력 아치에 근거하여 되메움 토압은 되메움 공간의 기하학적 형상에 의존한다고 제안하였다. 또한 정 (1997) 등은 사일로 토압 이론을 수정하여 되메움 굴착형상에 따른 수평토압의 산정식을 유도하였다.

또한 개착식 복개 구조물은 되메움재 보다 강성이 크기 때문에, 일반적으로 되메움 과정에 있어서 구조물 주변부에서의 침하가 구조물 상부에서의 침하보다 크게 발생한다. 이러한 상대 변위에 의해 복개 구조물 상부에서는 토피 하중보다 큰 연직 하중이 작용하는 역학적 특성을 가지게 된다. 복개 구조물의 상부에 작용하는 연직 토압은 박스 구조물과 되메움 지반의 상대 변위를 고려한 Marston-Spangler 이론 (1960) 및 그의 수정식 (Spangler and Handy, 1982)을 적용함으로써 구할 수 있다. 또한, Kellogg (1993)는 되메움 지반 내부에 아칭 효과를 고려함으로써 지하에 매설된 구조물에 작용하는 연직토압을 구하였다. 이러한 지반과 복개 구조물의 상호거동에 의하여 발생하는 연직토압을 고려하기 위하여, 일본에서는 Marston의 연직토압 이론을 바탕으로 복개 구조물의 높이 (H), 복개 구조물의 폭 (B) 등의 조건 변화에 따른 연직토압계수를 적용하고 있으며, 미

국 도로교통 관리협회 (AASHTO) 규정에는 양호한 기초지반 위에 설치된 돌출형 박스에 대하여 복개 구조물의 높이 (H), 복개 구조물의 폭 (B)을 고려한 연직토압을 제안하고 있다.

그러나 상기의 연구 등은 주로 옹벽 또는 Box형 지중 구조물 등과 같은 수직 강성벽체 조건에 국한되며, 벽체의 변형이 제한적인 경계 조건하에서만 수행되었다. 반면 아치형상의 복개 터널 구조물과 같이 벽체의 형상이 상이한 경우, 되메움 토체 내부에 발생하는 soil arching 효과 등을 합리적으로 고려할 수 없으므로 복개 터널구조물의 설계에 이들 연구 결과의 적용은 제한적이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 복개 터널구조물에 작용하는 토압에 영향을 미치는 되메움 토층의 입력변수 및 지형적 변수에 대해 민감도 분석 (sensitivity analysis)을 실시하여, 복개 터널구조물과 되메움 토층의 상호작용 측면에서 중요한 영향을 미치는 주요 설계인자들을 평가하고자 하였다. 민감도분석은 여러 입력변수들 가운데 출력변수, 즉 결과에 큰 영향을 미치는 주요 변수를 판정하기 위한 기법으로서 많은 불확실성을 가진 지반공학분야에서 널리 적용될 것으로 기대되고 있다 (Hoek 등, 1995). 하지만 아직까지 지반공학 분야에서 민감도분석의 적용사례는 아직 드물며 주로 정량적 분석이 아닌 정성적 분석에 머무르고 실정이다. 이러한 측면에서 본 연구에서는 정량적인 민감도분석을 적용하여 각 변수들에 대한 중요도의 절대적인 차이를 비교하여 아치형 복개터널구조물에 작용하는 토압에 주된 영향을 미치는 설계변수들을 결정하고자 하였다.

## 2. 민감도분석 기법

### 2.1 개요

터널 거동 해석시 입력변수는 측정오차, 정보의 부재 그리고 모델의 메커니즘에 대한 부족한 이해와 같은 많은 불확실성의 영향을 받는다. 이로 인해 모델 결과를 확신하는데 한계가 있다. 민감도분석은 이러한 입력변수들과 모델 변수들의 불확실성을 평가하는 방법이다. 또

한 민감도분석은 모델의 출력이 입력변수들의 변화에 어떻게 영향을 받는지 평가하여 모델의 신뢰성과 예측결과에 대한 신뢰성을 향상시키기 위해 사용된다. 따라서 민감도분석은 모델 입력변수의 불확실성의 결과로서 얻어지는 전체 불확실성을 정량화 하는데 목적을 둔 불확실성 해석 (uncertainty analysis)과 밀접한 관계가 있다 (Saltelli 등, 2000).

이와 같이 민감도분석은 결과의 변동에 가장 큰 영향을 미치는 입력변수들을 결정할 경우와 중요도가 낮아서 모델에서 제거할 수 있는 모델 변수들을 결정할 경우 등에 적용될 수 있다.

### 2.2 민감도분석의 종류

민감도분석 기법은 크게 선별기법 (screening), 국소적 민감도분석 (local sensitivity analysis) 그리고 대역적 민감도분석 (global sensitivity analysis)으로 구분할 수 있다. 선별기법은 한번에 하나의 변수에 대한 값을 변화시켜가며 표본을 추출하고 결과들에 대한 잔차를 비교하여 분석한다. 그러나 입력변수들의 상호작용을 고려하지 못하며 해석에 많은 표본이 필요하다는 단점을 가지고 있다. 또한 국소적 민감도분석에서는 입력변수들로 출력함수를 편미분하여 분석을 하며 해석적인 방법이다. 그러나 출력을 함수식으로 결정해야 하는 문제가 있으며 모델이 선형적이지 않고 상당한 불확실성이 입력변수들에 존재할 때 결과의 불확실성을 신뢰적으로 추정할 수 없는 것으로 보고되고 있다. 반면 대역적 민감도분석에서는 각 입력변수의 불확실성이 출력변수의 불확실성에 미치는 영향이 평가되며 각 입력변수에 대한 분포가 해석을 위한 입력으로 사용된다. 모든 변수들을 동시에 변화시키고, 각 입력변수의 전체 범위에 대해 민감도를 측정할 경우 대역적 민감도분석으로 고려한다 (Saltelli 등, 2000).

### 2.3 몬테카를로 시뮬레이션에 근거한 민감도 분석

몬테카를로 해석 (Monte Carlo simulation)은 대역적 민감도분석의 한 기법으로서, 무작위로 추출된 모델

입력변수들에 대한 결과를 평가하고 입력변수들이 모델 예측결과의 불확실성에 미치는 영향을 결정하기 위하여 적용된다. 본 연구에서는 이와 같이 다양한 입력변수들의 분포에 따른 결과들의 중요도와 불확실성을 분석하는데 유용한 몬테카를로 해석에 근거한 민감도분석을 수행하였다. 민감도 분석의 해석단계는 다음과 같다.

- ① 각 입력변수에 대한 범위와 분포를 선택
- ② 1단계에서 규정된 범위와 분포로부터 표본을 발생
- ③ 표본의 각 요소에 대해 모델을 평가
- ④ 불확실성 분석
- ⑤ 민감도분석

본 연구에서는 입력변수의 범위를 동일한 확률을 가진  $N$ 개의 간격으로 나누고 각 간격에서 입력변수의 값을 추출하는 표본추출 기법인 Latin hypercube 표본추출기법을 적용하였다. 이 기법은 출력결과가 입력변수들 가운데 단지 몇 가지 요소들에 의해 지배될 때 매우 우수하다. 또한 출력결과들의 평균과 분포함수를 추정하는데 있어 무작위 표본추출기법보다 우수하다고 알려져 있다 (Hoek 등, 1995).

추출된 표본들을 모델에 적용하여 얻어진 결과들의 기대값과 편차를 분석하는 불확실성 분석을 수행한 다음 민감도분석을 수행하게 된다. 민감도분석에서는 각 기법에 대해서 출력변수  $Y$ 와 입력변수  $X_j$  사이에 상관관계가 존재한다고 가설 (hypothesis)을 세우고, 설정된 유의수준 (confidence level)에서 가설을 검증하여 가설이 기각되는지를 판단한다.

민감도분석에는 6개의 민감도지수가 사용될 수 있다. 첫 번째로 입력변수와 출력변수 사이의 선형상관계수 (linear correlation coefficient)로 정의되는 PEAR (Pearson product moment correlation coefficient)와 두 번째로 비선형적인 모델에 대해서는 상관관계의 척도로서 SPEA (Spearman coefficient)가 선호된다. SPEA는 원래 데이터 대신에  $Y$ 와  $X_j$ 의 순위 (rank)를 대입하여 계산된다 (Conover, 1980).

또한 선형회귀모델에 최소자승법을 적용하여 각 입력변수의 변화로 인한 영향을 정량화한 SRC (Standard Regression Coefficient)을 적용할 수 있다. 그리고 출력결과  $Y$ 와 입력변수  $X_j$ 를 다음의 식 (1)과 같은 회귀모델로 구한 뒤,  $Y - \hat{Y}$ 와  $X_j - \hat{X}_j$ 간의 상관계수로서 정

의되는  $Y$ 와  $X_j$  사이의 편상관계수인 PCC (Partial Correlation Coefficient)가 두 변수들 사이의 선형관계에 대한 척도를 나타내기 위해 적용된다 (Helton, 1993).

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{h \neq j} b_h x_h, \quad \hat{X}_j = c_0 + \sum_{h \neq j} c_h x_h \quad (1)$$

여기서  $x_h$ 는 입력변수이며  $b_h$ 와  $c_h$ 는 회귀분석에서 얻어지는 계수들이다.

이상의 4가지 지수들은 종속변수와 독립변수 사이의 선형관계에 근거한 회귀분석으로부터 얻어지기 때문에, 상호관계가 비선형일 경우에는 낮은 상관계수가 얻어지며 좋지 못한 결과를 산출할 경우가 있다. 이러한 비선형적인 문제를 해결하기 위해 순위변환(rank transform)이 적용된다. 순위 변환은 원래 데이터를 각각에 해당되는 순위로 교체하는 단순한 과정이다. 샘플링에서 얻어진  $N$ 개의 벡터들  $(x_{11}, \dots, x_{1k}), \dots, (x_{N1}, \dots, x_{Nk})$ 로 구성된 집합 (여기서  $k$ 는 입력변수의 개수)에 대해 모델을 반복적으로 평가하여  $N$ 개의 출력값으로 구성된 벡터  $y = (y_1, \dots, y_N)$ 를 발생시킨다. 그 다음 출력결과들을 각각에 해당하는 순위 (최대값은 1, 최소값은  $N$ )로 교체한다. SRC와 PCC에서 얻어진 순위들을 대입하여 얻어진 민감도지수는 각각 SRRC (Standardized Rank Regression Coefficient) 또는 PRCC (Partial Rank Correlation Coefficient)로 정의된다. 순위변환에서는 선형회귀기법이 사용되지만 입력-출력 분포들 사이의 비선형적인 관계와 관련이 있다. 그러나 순위를 사용하여 얻어진 결론은 원래 모델로 쉽게 변형될 수 없으며 다른 모델에 대한 정보가 될 수 있는 위험이 있기 때문에 순위변환에 근거한 해석결과들을 해석할 때 주의를 기울여야 한다 (Saltelli & Sobol, 1995).

본 연구에서는 입력변수의 분포들을 수치해석에 대입하여 얻어진 출력결과들에 대해, 이상과 같은 PEAR, SPEA, SRC, PCC, SRRC 및 PRCC의 총 6가지 민감도지수를 구하여 각 입력변수의 영향을 정량적으로 분석하고자 하였다.

### 3. 민감도 분석을 위한 해석조건 및 입력자료

본 연구는 아치형 복개 터널구조물에 작용하는 토압에 영향을 미치는 지형적 영향인자 및 지반정수 변화에 따른 민감도 분석을 수행하기 위하여 2차선 도로터널 (폭: 11.98m, 높이 : 8.5m, 콘크리트 라이닝 두께 : 100cm) 단면을 해석대상으로 선정하고, 콘크리트 라이닝은 beam 요소, 지반요소는 2차원 평면변형을 요소로 모델링 하였다. 해석시에는 연약지반, 성토 및 성토사면 안정, 실드터널 등과 관련된 지반공학적 제반 문제 해결을 위하여 널리 적용되고 있는 유한요소 해석프로그램인 PLAXIS (Ver. 7.2)를 이용하였다.

#### 3.1 민감도 분석을 위한 해석변수 및 조건

복개구조물은 원지반 조건에 따라 일정구배를 갖는 굴착사면으로 지반굴착 후 복개구조물을 시공하고, 이후에 좁은 되메움 공간 및 복개구조물 상부에 성토를 실시한다. 따라서 본 연구는 다양한 영향인자에 대한 민감도 분석을 위한 수치해석시 상기와 같은 단계 성토과정을 모사하였다. 또한 아치형 복개 터널구조물에 작용하는 토압의 영향인자로서 원지반의 굴착사면 구배, 천단부 토피고, 굴착 폭 등과 같은 총 3가지 지형적 영향인자 변화에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 또한 되메움 토층의 탄성계수, 단위중량, 내부마찰각, 프와손비 및 되메움 토층과 복개 터널구조물의 접촉면의 경계요소 (interface element) 등과 같은 총 5가지 지반정수 변화에 따른 민감도 분석을 수행하였다 (그림 1~2 참조). 상기와 같은 아치형 복개 터널구조물의 역학적 거동 및 토압분포의 영향인자 이외에 원지반의 지반정수, 측압계수, 굴착사면 내에 설치되는 소단 등과 같은 다양한 영향인자가 있으나, 본 연구에서는 이에 대한 민감도 분석은

수행하지 않았다. 상기와 같은 원지반 굴착에 따른 영향을 최소화하기 위하여 원지반은 굴착사면 구배변화 무관하게 경암인 조건으로 가정하고 변위를 제어하였다. 수치해석시 원지반 조건으로 가정한 경암의 지반정수는 1998년 한국건설기술연구원에서 수행한 [국내 터널설계 기술력 향상을 위한 신기술 연구 (I)]의 조사결과를 토대로 산정하였다 (표 1 참조).

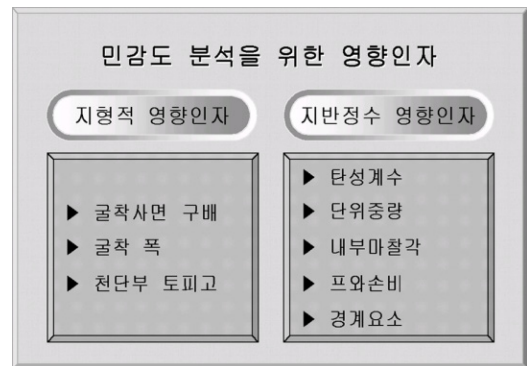


그림 1. 민감도 분석을 위한 영향인자

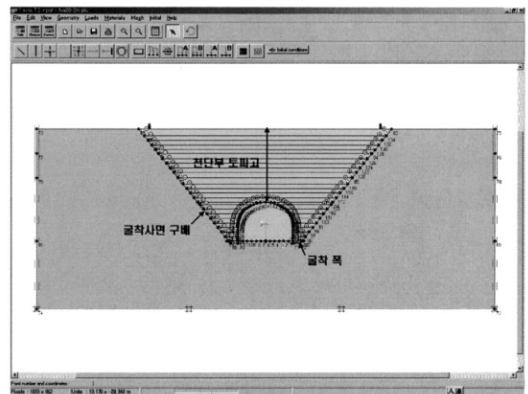


그림 2. 민감도 분석을 위한 수치해석 단면 및 지형적 영향인자 개념도

표 1. 수치해석을 위한 원지반 (경암) 지반정수

	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	탄성계수 (kN/m <sup>2</sup> )	c (kN/m <sup>2</sup> )	□ (□)	□	K <sub>0</sub>	비고
경암	27	1.9□0 <sup>7</sup>	1400	43	0.23	1.0	

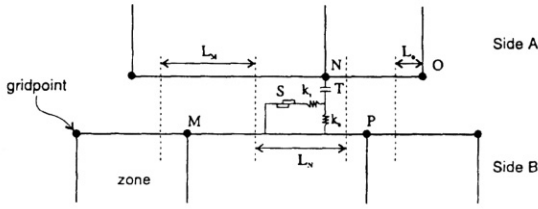


그림 3. 전단 및 연직 강성스프링으로 연결된 경계요소 개념도

서로 다른 매질 사이에서 상호간에 발생하는 힘의 전달 과정을 정확히 모사하기 위한 경계요소는 그림 3에서 보이는 바와 같이 수치해석시 경계요소를 경계로 연결되어 있는 각 요소를 전단강성과 연직강성을 갖는 스프링으로 모델링하는 방법과 흙의 강도정수 ( $c, \phi$ )에 감소계수 ( $R$ )를 이용하여 경계요소를 모델링하는 방법이 등이 일반적으로 적용되고 있다 (식 2~3 참조)

$$C_{interface\ element} = R \cdot c_{soil} \quad (2)$$

$$\tan \phi_{interface\ element} = R \cdot \tan \phi_{soil} \quad (3)$$

여기서,  $C_{interface\ element}$  : 경계요소의점착력

$c_{soil}$  : 경계요소와 접하는 흙의 점착력

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

$\phi_{soil}$  : 경계요소와 접하는 흙의 내부마찰각

$R$  : 감소계수

이 가운데 본 연구에서는 콘크리트 라이닝 및 사면과 접하여 시공되는 성토체의 강도정수에 감소계수를 적용하여 경계요소를 모사하는 기법을 이용하였다. 경계요소의 모델링을 위한 감소계수 ( $R$ )는 표 2에서 보이는 바와 같이 지반의 종류 및 흙과 접하게 되는 대상 구조물의 재질에 따라 그 값이 변화하는 것으로 제안되고 있으며, 본 연구는 콘크리트 라이닝과 뒷채움재가 모래인 조건에 대하여 민감도 분석을 수행하였다.

### 3.2 민감도 분석을 위한 영향인자의 입력분포 발생

본 연구에서는 앞서 2장에서 설명한 여러 민감도분석

표 2. 경계요소의 범위

지반의 종류	대상 구조물의 재질	R	비고
sand	steel	2/3	
	concrete	0.8~1.0	
clay	steel	0.5	
	concrete	0.7~1.0	

기법들 가운데 입력변수가 많은 경우 유리한 것으로 밝혀진 몬테카를로 시뮬레이션에 근거한 민감도분석을 적용하고자 하였다. 가능하면 많은 표본을 추출하여 해석에 적용하는 것이 유리하나 아치형 복개 터널구조물에 작용하는 토압 영향인자는 표 1과 같이 총 8개이며 수치해석에 많은 시간이 소요된다는 문제가 있다. 따라서 해석변수들의 표본들을 발생시킬 때, 보다 적은 표본을 사용하고서도 좋은 결과를 산출하는 것으로 알려진 Latin hypercube 표본추출기법을 적용하였다 (Hoek 등, 1995).

여러 지반공학적 문제들은 일반적으로 정규분포 (normal or gaussian distribution)를 따르며 가장 널리 적용되고 있으므로 (Hoek 등, 1995), 되메움 토층의 지반정수의 평균은 여러 문헌을 참고하여 (村田恒雄 등, 1989; 정성교 등, 1996; 문창열 등, 1997; 유건선 등, 1997; 배규진 등, 2001, 2003) 결정하였으며, 이러한 지반정수는 정규분포를 따르며 표준편차는 평균값의 10%로 가정하였다. 또한 지형적 영향인자 굴착사면 구배는 원지반 조건에 따라 상이하나, 일반적으로 원지반이 풍화암인 경우 1:1.0, 연암 1:0.8, 경암 1:0.5의 구배가 일반적으로 적용되며, 최근에는 원지반 굴착에 따른 용지보상, 굴착량을 최소화하기 위하여 가시설 흙막이 벽체를 시공하여 수직으로 굴착하기도 한다. 따라서 본 연구에서는 민감도 분석을 위한 굴착사면 구배의 평균값을 67.5%로 가정하였으며, 굴착 폭은 2m 천단부 토피고는 1.0D (D:등가환산직경, 약 11.36m)로 가정하고 각각의 표준편차는 평균값의 10%로 가정하였다 (표 3 참조).

Latin hypercube 표본추출기법에서는 입력변수 개수의 1.5배 이상 표본을 추출할 것을 추천하고 있다

표 3. 표본추출을 위해 가정된 영향인자들의 입력분포

구 분	평 균 값	표준편차	분 포
굴착사면 구배(□)	67.5	6.75	정규분포
굴착 폭(m)	2	0.2	정규분포
천단부 토피고(m)	11.36	1.136	정규분포
탄성계수(kN/m <sup>2</sup> )	4.3□10 <sup>3</sup>	4.3□10 <sup>2</sup>	정규분포
단위중량(kN/m <sup>3</sup> )	20	2	정규분포
내부마찰각(□)	32	3.2	정규분포
프와손비(□)	0.32	0.032	정규분포
경계요소(R)	0.9	0.09	정규분포

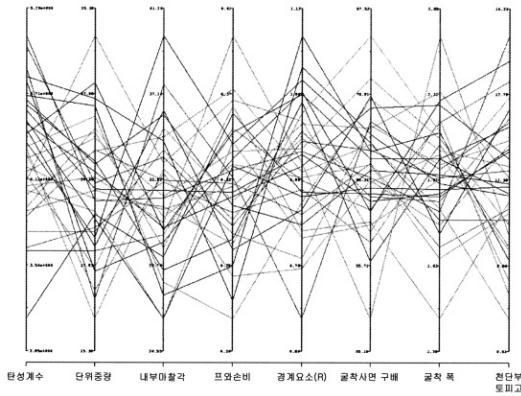


그림 4. Latin hypercube 기법으로 추출된 표본들에 대한 영향인자들의 상관성

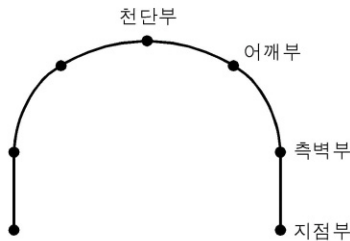


그림 5. 출력변수 구분 지점 개요

(Saltelli 등, 2000). 본 연구에서 아치형 복개 터널구조물에 작용하는 토압 영향인자, 즉 입력변수들의 개수가 8개이므로 입력변수 개수의 4배 이상을 가정하여 총 32

개의 표본을 Latin hypercube 기법에 의해 추출하였으며 추출된 표본들의 상관관계는 그림 4와 같다. 표본추출결과 표본들은 가정된 정규분포를 잘 따르는 것으로 나타나 Latin hypercube 기법에 의해 표본들이 타당하게 추출된 것으로 판단되었다.

## 4. 민감도분석 해석결과

### 4.1 해석결과의 분포해석

민감도 분석을 위하여 3.2절에서 추출된 32가지 표본을 이용한 수치해석을 수행하였으며, 출력변수는 그림 5에서 보이는 바와 같이 아치형 복개 터널구조물의 천단부, 어깨부, 측벽부 및 지점부에서의 연직 및 수평토압 변수 총 8개로 선정하였으며, 32가지 표본에 대한 수치해석을 통하여 얻어진 출력변수들의 결과를 정리하면 표 4와 같다. 8개의 출력변수들의 분포는 그림 6에서 보이는 바와 같이 정규분포를 따르지 않고 몇몇 구간에 집중되는 경향이 있는데 이는 복개 터널구조물에 작용하는 토압은 지배적인 영향인자 이외에 비 지배적인 영향인자들의 상호 복합적인 영향에 기인한 것으로 판단된다.

### 4.2 민감도지수 분석

아치형 복개 터널구조물에 작용하는 토압에 영향을 미치는 영향인자 8개 변수들의 중요도와 민감도를 정량적

표 4. 전체 표본들에 대한 수치해석결과

출력 변수	평균	표준편차	분포
천단부 수평토압 (kN/m <sup>2</sup> )	94.44	19.57	비 정규분포
천단부 연직토압 (kN/m <sup>2</sup> )	245.23	24.19	비 정규분포
어깨부 수평토압 (kN/m <sup>2</sup> )	98.81	18.90	비 정규분포
어깨부 연직토압 (kN/m <sup>2</sup> )	253.71	28.25	비 정규분포
측벽부 수평토압 (kN/m <sup>2</sup> )	117.97	18.45	비 정규분포
측벽부 연직토압 (kN/m <sup>2</sup> )	115.51	21.24	비 정규분포
지점부 수평토압 (kN/m <sup>2</sup> )	49.55	19.98	비 정규분포
지점부 연직토압 (kN/m <sup>2</sup> )	80.51	19.40	비 정규분포

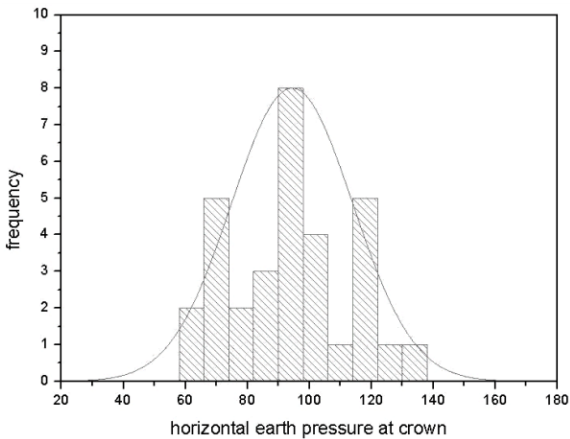


그림 6. 어깨부에 작용하는 수평토압 분포

으로 분석하기 위하여 수치해석을 통하여 얻어진 32가지 경우의 결과에 대하여 2장에서 설명한 PEAR, SPEA, PCC, PRCC, SRC 및 SRCC의 6가지 민감도지수를 계산하여 분석하였으며, 이때 유의수준은 0.95이다.

선형회귀모델에 근거한 SRC, SRCC, PEAR 및 SPEA는 모든 경우에 가설이 기각되어 적용할 수 없는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구는 가설이 기각되지 않은 PCC와 PRCC를 척도로 분석을 수행하였다.

입력변수들 사이의 상관관계가 없는 경우 SRC와 PCC에 근거한 변수의 순위는 동일하다 (Saltelli 등, 2000). 그러나 SRC와 PCC의 순위는 모든 경우에 다르게 나타나 입력변수들 사이에 상관관계가 존재함을 알 수 있다. 또한 여기서 민감도지수의 부호는 양 (+) 또는 음 (-)의 상관관계를 의미하며, 민감도지수의 절대값 크기 순서로

순위가 결정된다.

가설이 기각되지 않은 PCC와 PRCC를 비교해 보면 입력변수가 탄성계수인 경우 지점부 수평토압 및 어깨부 연직토압, 입력변수가 내부마찰각인 경우 지점부 수평토압, 입력변수가 굴착 폭인 경우 천단부 수평토압의 PRCC의 결정계수가 PCC의 결정계수보다 다소 큰 것으로 나타나 비선형적인 영향이 다소 크다는 것을 유추할 수 있으나, 두 결정계수의 차가 최소 0.0118에서 최대 0.095 정도로 유사하며, 상기 4가지 경우를 제외한 나머지 60가지의 경우에서 모두 PCC에 대한 결정계수가 PRCC의 결정계수보다 크게 나타났다. 따라서 본 연구는 아치형 복개 터널구조물에 작용하는 토압에 영향을 미치는 입력변수의 민감도분석을 위하여 PCC를 지표로 하여 해석하였다.

#### 4.2.1 수평토압에 대한 민감도분석

천단부에 작용하는 수평토압의 경우 되메움 토층의 프와손비에 대한 PCC는 0.956으로서 가장 큰 영향을 미치며, 단위중량 및 토피고에 대한 PCC도 각각 0.89, 0.866으로 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 나머지 입력변수들에 대한 PCC의 절대값은 0.403 이하로서 약 60%이상의 불확실성 (uncertainty)이 포함되는 것으로 나타나 천단부에 작용하는 수평토압에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있으며, 특히 굴착 폭은 PCC는 0.175로 나타나 가장 낮은 민감도를 보였다 (그림 7 및 표 5 참조).

어깨부에 작용하는 수평토압의 경우 천단부와 유사한 입력변수들이 큰 영향을 주는 것으로 나타났으나, 최대



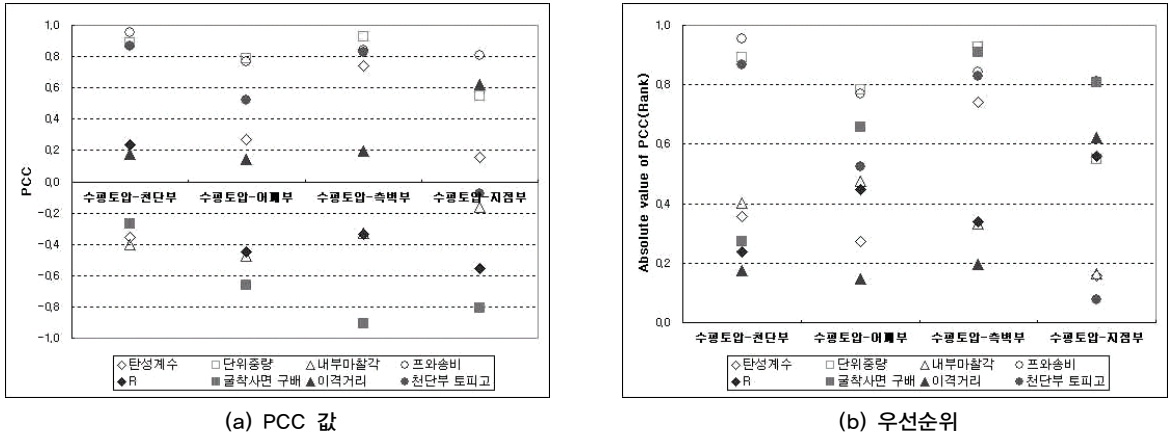


그림 7. 입력변수와 수평토압의 상관관계

표 5. 수평토압에 대한 입력변수별 PCC 결정계수 절대값

	천단부	어깨부	측벽부	지점부
탄성계수	0,357	0,271	0,743	0,158
단위중량	0,890 <sup>2)</sup>	0,785 <sup>1)</sup>	0,927 <sup>1)</sup>	0,551
내부마찰각	0,403	0,474	0,331	0,165
프와손비	0,956 <sup>1)</sup>	0,769 <sup>2)</sup>	0,842 <sup>3)</sup>	0,810 <sup>1)</sup>
경계요소	0,237	0,449	0,339	0,558
굴착사면 구배	0,272	0,658 <sup>3)</sup>	0,908 <sup>2)</sup>	0,808 <sup>2)</sup>
굴착 폭	0,175	0,146	0,197	0,623 <sup>3)</sup>
토피고	0,866 <sup>3)</sup>	0,524	0,828	0,075

1), 2), 3) : 결정계수 절대값 순위

PCC 절대값이 0.9 이하로 지배적인 영향인자는 없는 것으로 나타났다. 따라서 어깨부에 작용하는 수평토압은 천단부와는 달리 단위중량, 토피고 등과 같은 주요 입력 변수에 지배적인 영향을 받지 않고, 보다 다양한 입력 변수에 영향을 받는 것으로 판단된다.

측벽부에 작용하는 수평토압의 경우 되메움 토층의 단위중량과 굴착사면 구배에 대한 PCC는 각각 0.927, 0.908로서 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 프와손비와 탄성계수를 제외한 나머지 입력변수들에 대한 PCC의 절대값은 0.339 이하로서 약 66%이상의 불확실성 (uncertainty)이 포함되는 것으로 나타나 측벽부에 작용하는 수평토압에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있다. 또한 지점부에 작용하는 수평토압의 경우

측벽부와 유사한 입력변수들이 큰 영향을 주는 것으로 나타났으나, 최대 PCC 절대값이 0.9 이하로 지배적인 영향인자는 없는 것으로 나타났다.

천단부, 어깨부 및 측벽부에 작용하는 수평토압에 대한 굴착 폭의 PCC는 0.2 미만이나, 지점부에 작용하는 수평토압은 굴착 폭에 대한 PCC가 0.623으로 증가하였으며, 굴착사면 구배의 PCC는 수평토압 작용 지점이 아치형 복개 터널구조물 하부로 변화해 감에 따라 PCC 절대값이 점차 증가하는 경향을 보이며, 또한 지점부에 작용하는 수평토압에 대한 단위중량 및 토피고에 대한 PCC는 각각 0.551, 0.075로 크게 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 아치형 복개 터널구조물에 작용하는 수평토압은 작용위치가 구조물 하부로 변화함에 따라 굴착

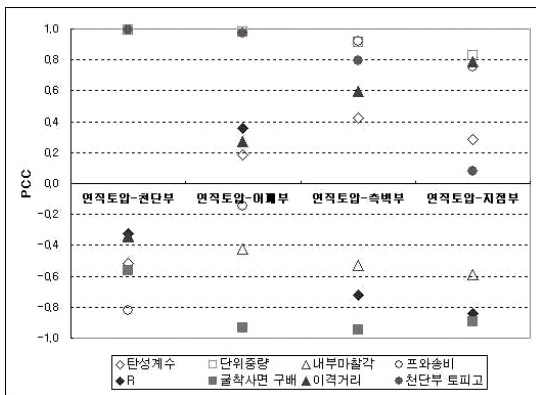
사면 구배 및 굴착 폭에 대한 영향이 증가하며, 이로 인하여 수평토압에 영향을 미치는 입력변수가 변화하는 것으로 판단된다. 각 입력변수별 PCC에 대한 결정계수 절댓값은 표 5와 같다.

#### 4.2.2 연직토압에 대한 민감도분석

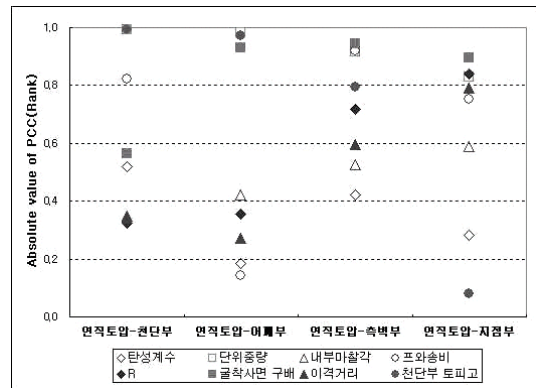
천단부에 작용하는 연직토압의 경우 되메움 토층의 단위중량 및 천단부 토피고에 대한 PCC는 각각 0.992, 0.993으로서 가장 큰 영향을 미치며, 프와손비에 대한 PCC도 0.822로 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 탄성계수와 굴착사면 구배를 제외한 나머지 입력변수들에 대한 PCC의 절댓값은 0.347 이하로서 약 65%이상의 불확실성 (uncertainty)이 포함되는 것으로 나타

나 천단부에 작용하는 연직토압에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다 (그림 8 및 표 6 참조). 어깨부에 작용하는 연직토압의 경우 되메움 토층의 단위중량, 굴착사면 구배 및 천단부 토피고에 대한 PCC는 각각 0.981, 0.931, 0.971로서 가장 큰 영향을 미치며, 나머지 입력변수들에 대한 PCC의 절댓값은 0.421 이하로서 약 58%이상의 불확실성 (uncertainty)이 포함되는 것으로 나타나 천단부에 작용하는 연직토압에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 측벽부에 작용하는 연직토압은 되메움 토층의 단위중량, 프와손비 및 굴착사면 구배에 대한 PCC가 각각 0.915, 0.920, 0.946으로서 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

그러나, 지점부에 작용하는 연직토압의 경우 되메움



(a) PCC 값



(b) 우선순위

그림 8. 입력변수와 연직토압의 상관관계

표 6. 연직토압에 대한 입력변수별 PCC 결정계수 절댓값

	천단부	어깨부	측벽부	지점부
탄성계수	0.519	0.186	0.422	0.283
단위중량	0.992 <sup>2)</sup>	0.981 <sup>1)</sup>	0.915 <sup>3)</sup>	0.829 <sup>3)</sup>
내부마찰각	0.347	0.421	0.528	0.587
프와손비	0.822 <sup>3)</sup>	0.144	0.920 <sup>2)</sup>	0.753
경계요소	0.324	0.355	0.719	0.841 <sup>2)</sup>
굴착사면 구배	0.563	0.931 <sup>3)</sup>	0.946 <sup>1)</sup>	0.894 <sup>1)</sup>
굴착 폭	0.340	0.271	0.595	0.790
토피고	0.993 <sup>1)</sup>	0.971 <sup>2)</sup>	0.793	0.081

1), 2), 3) : 결정계수 절댓값 순위

토층의 단위중량 및 굴착사면 구배 등이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 최대 PCC 절대값이 0.9 이하로 지배적인 영향인자는 없는 것으로 판단된다.

입력변수 가운데 경계요소 및 굴착 폭에 대한 PCC 절대값은 연직토압의 작용위치가 천단부에서 지점부로 변화함에 따라 점차 증가하며, 토피고에 대한 PCC 절대값은 경계요소와는 반대로 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 콘크리트 라이닝과 되메움 토체 접촉면에서의 전단 저항과 되메움 토체 내부의 soil arching 효과 등으로 인한 것으로 판단된다.

이상의 민감도분석 결과를 정리하면 아치형 복개 터널 구조물에 작용하는 수평 및 연직토압의 작용위치에 따라 동일한 영향인자에 대한 민감도가 상이한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구는 각 입력변수별 PCC 결정계수 절대값의 크기 (합계)를 토대로 아치형 복개 터널구조물에 작용하는 연직 및 수평토압에 전반적으로 가장 큰 영향을 미치는 입력변수로 결정하였다. 표 7에서 보이는 바와 같이 연직토압은 되메움 토층의 단위중량이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 수평토압은 프와손비와 단위중량에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러

나 연직변형율에 대한 수평변형율의 비인 프와손비는 입력변수 가운데 가장 작은 평균값과 표준편차를 갖으며 (표 3 참조), 프와손비 변화에 따른 출력변수의 절대값 변화가 크지 않더라도 미소한 구간에서 프와손비가 변화하므로 상대적으로 높은 민감도를 보이는 것으로 판단된다. 따라서 아치형 복개 터널구조물에 작용하는 연직 및 수평토압에 전반적으로 가장 큰 영향을 미치는 입력변수는 되메움 토층의 단위중량인 것으로 판단된다. 위치변화에 따라 토압에 가장 큰 영향을 미치는 입력변수는 표 8에서 보이는 바와 같다.

천단부 및 지점부 수평토압에 대한 PCC 결정계수 절대값은 입력변수 프와손비가 가장 큰 것으로 나타났으나, 상기와 같이 프와손비는 평균 및 표준편차는 가장 미소구간이며 이로 인하여 상대적으로 높은 민감도를 나타내는 것으로 판단되므로, 이를 고려하면 천단부에 작용하는 토압은 토피고, 어깨부에 작용하는 토압은 단위중량, 측벽부 연직토압은 굴착사면 구배, 수평토압은 단위중량에 가장 큰 영향을 받으며, 지점부에서는 굴착사면 구배에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

민감도 분석을 위한 지반정수 영향인자에 대한 PCC

표 7. 각 입력변수별 PCC 결정계수 합계

입력변수	출력변수	연직토압	수평토압
		PCC 결정계수 절대값의 크기 (합계)	PCC 결정계수 절대값의 크기 (합계)
탄성계수		1,410	1,529
단위중량		3,717	3,153
내부마찰각		1,883	1,373
프와손비		2,639	3,377
경계요소		2,239	1,583
굴착사면 구배		3,334	2,646
굴착 폭		1,996	1,141
토피고		2,838	2,293

표 8. 지점별 토압 최대 영향인자

		천단부	어깨부	측벽부	지점부
연직토압	최대 영향인자	토피고	단위중량	굴착사면 구배	굴착사면 구배
	PCC 결정계수	0.993	0.981	0.946	0.894
수평토압	최대 영향인자	토피고	단위중량	단위중량	굴착사면 구배
	PCC 결정계수	0.890	0.785	0.927	0.808

결정계수 절대값이 토압의 작용위치 변화에 따라 일정한 경향 또는 절대값의 변화가 크지 않으나, 지형적 영향인자 가운데 굴착사면 구배에 대한 천단부 연직 및 수평토압의 PCC 결정계수 절대값은 각각 0.324, 0.272이나, 어깨부와 측벽부에서의 결정계수 절대값이 점차 증가하며 지점부에서는 0.808, 0.894로 증가하며, 경계요소에 대한 PCC 결정계수 절대값도 유사한 경향으로 변화하는 것으로 나타났다. 또한 토피고에 대한 민감도는 천단부 연직 및 수평토압의 PCC 결정계수가 각각 0.993, 0.866이나, 지점부에서는 0.081, 0.075로 감소하는 것으로 나타났으며, 또한 굴착 폭에 대한 PCC 결정계수 절대값은 토피고와 유사한 경향으로 변화하는 것으로 나타났다 (표 5~6 참조).

아치형 복개 터널구조물에 작용하는 토압의 영향인자에 대한 민감도 분석결과 지형적 영향인자 가운데 토피고, 굴착사면 구배가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 지반정수 영향인자 가운데 되메움 토층의 단위중량과 경계요소가 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서, 합리적이고 경제적인 복개 터널구조물의 설계와 시공을 위하여 복개 구조물과 되메움 지반의 상호거동 및 soil arching 효과 등을 고려하기 위한 경계요소와 천단부 토피고, 되메움 토체의 단위중량 및 원지반 굴착사면 구배 등과 같이 아치형 복개 터널구조물에 작용하는 토압에 가장 큰 영향인자를 고려한 토압분포를 설계 및 해석에 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

#### 4.2.3 아치형 복개 터널구조물에 작용하는 토압 분석을 위한 수치해석

##### 4.2.3.1 수치해석 개요

전술한 바와 같이 아치형 복개 터널구조물에 작용하는 토압은 천단부 토피고, 되메움 토체의 단위중량 및 굴착사면 구배에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 이 가운데

단위중량은 다짐 등과 같은 현장시공조건에 따라 변화하므로, 동일 현장내에서도 위치별로 그 값의 분포가 상이할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수치해석기법을 통하여 아치형 복개 터널구조물에 작용하는 토압에 영향을 미치는 최대 영향인자인 토피고 및 굴착사면 구배변화에 따른 토압의 변화에 대한 정량적 분석을 수행하였다. 이를 위하여 천단부 토피고 0.0D, 0.5D, 1.0D 및 1.5D인 각각의 경우에 대하여 굴착사면 구배가 1:1, 1:0.8, 1:0.5 및 90°로 변화하는 조건 (총 16 cases)에 대하여 수치해석을 수행하였다. 또한 수치해석시 굴착 폭은 2m로 가정하였으며, 지반굴착 및 되메움 과정에서 굴착사면 거동에 따른 영향을 최소화하기 위하여 원지반의 입력변수는 민감도 분석시 적용한 입력변수로 결정하고 지반변위를 제어하였다.

수치해석을 위한 지반정수는 1998년 한국건설기술연구원에서 수행한 “국내 터널설계 기술력 향상을 위한 신기술 연구 (I)”의 조사결과 및 민감도 분석을 위한 문헌조사 가운데 배규진 등 (2003)이 연구에 적용한 입력변수를 적용하였다 (표 9 참조).

#### 4.3.2.2 수치해석 결과

##### (1) 연직토압

아치형 복개 구조물에 작용하는 연직토압은 수치해석결과 천단부 토피고가 0.5D 이하인 경우에는 성토고와 되메움 토층의 단위중량에 의해 결정되는 토피하중과 분포가 유사한 것으로 나타났다. 또한 굴착사면 구배가 90°인 경우를 제외하고는 천단부 토피고가 1.0D 이상인 경우 복개 구조물의 강성이 되메움 토체의 강성보다 매우 크기 때문에 구조물 주변부에서의 침하가 구조물 상부에서 보다 크게 발생하고, 굴착사면과 되메움 토층 접촉면의 마찰 저항 등으로 인하여 천단부에서는 토피하중보다 큰 연직토압이 측벽부에서는 토피하중보다 작은 연직토압이 작용하는 것으로 나타났으며, 굴착사면 구

표 9. 수치해석을 위한 지반정수

	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	탄성계수 (kN/m <sup>2</sup> )	c (kN/m <sup>2</sup> )	□ (□)	□	K <sub>o</sub>	비고
되메움 토층	19	3.5□0 <sup>4</sup>	10	30	0.35	1-sin□	
경암	27	1.9□0 <sup>7</sup>	1400	43	0.23	1.0	

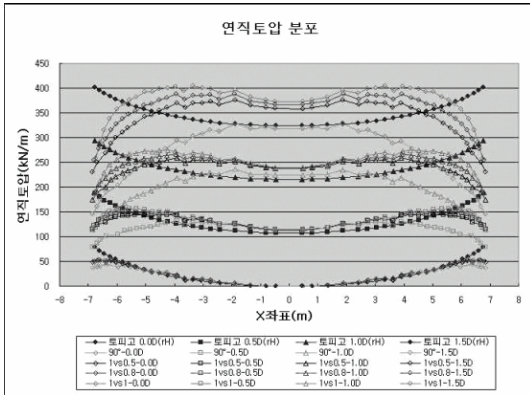


그림 9. 굴착사면 구배 및 토피고 변화에 따른 연직토압 및 토피하중 분포

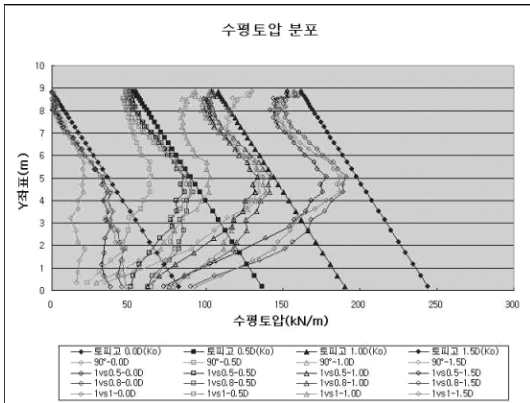


그림 11. 굴착사면 구배 및 토피고 변화에 따른 수평토압 및 정지토압 분포

배가 90°인 경우에는 복개 구조물과 되메움 토체의 상대 변위에 의한 응력증가가 작고, 굴착사면과 되메움 토체의 마찰저항에 의한 영향이 증가하기 때문에 좌우측 어깨부 내측의 연직토압은 토피하중과 유사하나, 측벽부의 연직토압은 크게 감소하는 것으로 나타났다 (그림 9 참조).

수치해석결과 굴착사면 구배 변화에 따른 아치형 복개 구조물에 작용하는 연직토압은 굴착사면 구배가 1:0.5 인 경우 각 토피고별로 토피하중과 유사한 크기의 연직 토압이 작용하는 것으로 나타났으나, 굴착사면 구배가 90° 급해짐에 토피하중에 비하여 최대 약 19% 정도 감소하고, 굴착사면 구배가 1:1로 완만해짐에 따라 토피

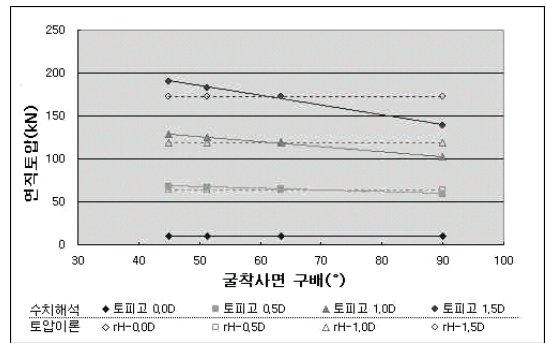


그림 10. 굴착사면 구배 및 토피고 변화에 따른 연직토압

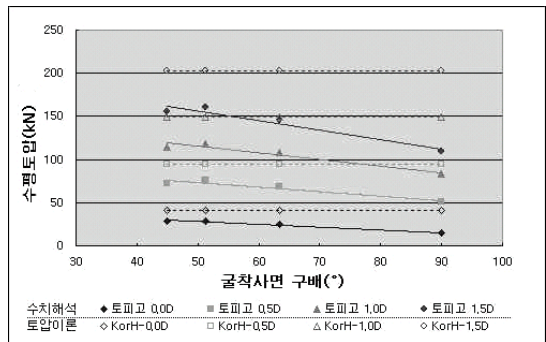


그림 12. 굴착사면 구배 및 토피고 변화에 따른 정지토압

하중에 비하여 최대 약 110% 정도 증가하는 것으로 나타났다 (그림 10 참조).

## (2) 수평토압

토압이론에 따른 각 토피고별 정지토압분포와 수치해석결과 굴착사면 구배 변화에 따른 토압분포는 그림 11 과 같다. 천단부에서 좌우측 측벽부까지의 수평토압 분포는 정지토압분포와 유사하게 되메움 심도가 증가함에 따라 증가하나, 좁은 공간에서의 되메움 특성으로 인하여 점차 감소하는 것으로 나타났다 (그림 11 참조).

수치해석결과 굴착사면 구배 변화에 따른 아치형 복개 구조물에 작용하는 수평토압은 굴착사면 구배가 증가함

에 따라 감소하며, 정지토압 보다 약 23~64% 정도 작은 것으로 나타났다. 굴착사면 구배 증가에 따른 수평토압은 천단부 토피고가 0.0D (천단부 성토 완료 시)인 경우 정지토압 분포에 비하여 최대 약 64% 정도 감소하나, 천단부 토피고가 0.5D~1.5D 인 경우 토피고 변화에 따른 큰 변화 없이 최대 약 46% 정도 감소하는 것으로 나타났다 (그림 12 참조).

## 5. 결론

본 연구에서는 복개 터널구조물에 작용하는 총 8개의 토압에 대한 영향인자에 대해서 Latin hypercube 표본 추출기법을 이용하여 추출된 32가지 표본에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석에서 8개의 출력인자들을 대상으로 하여 각각의 결과에 영향을 미치는 입력변수들의 중요도를 정량적인 민감도분석 및 최대 영향인자 변화에 따른 아치형 복개 구조물에 작용하는 토압에 대한 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 아치형 복개 터널구조물에 작용하는 수평토압은 작용 지점이 천단부에서 하부로 변화함에 따라 굴착 폭에 대한 영향은 증가하나 단위중량 및 천단부 토피고에 대한 영향은 감소하는 것으로 나타났으며, 또한 연직토압은 작용 지점이 하부로 변화해 감에 따라 경계요소 및 굴착 폭에 대한 영향은 증가하나, 토피고에 대한 영향은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 토압의 작용 메커니즘을 고려할 때, 터널 천단부보다 하부에서는 되메움재의 상재하중으로 인한 영향이 줄어들기 때문에 단위중량과 토피고와 같은 상재하중의 주요 요인보다는 굴착 폭과 같은 설계인자의 영향이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 합리적이고 경제적인 복개 터널구조물 시공을 위하여 복개 구조물과 되메움 지반의 상호거동, soil arching 효과 및 원지반 굴착 후 복개 구조물 시공으로 기인한 좁은 공간에서의 되메움 특성 등을 고려한 토압분포의 적용이 필요할 것이다.
2. 아치형 복개 구조물에 작용하는 연직토압은 복개 구조물과 되메움 토체의 큰 강성비 차이에 의한 상대변

- 위 등의 영향으로 인하여 굴착사면 구배가 1:0.8 및 1:1 인 경우 토피하중 보다 최대 약 110% 정도 큰 연직토압이 작용하며, 굴착사면 구배가 1:0.5 및 90°인 경우 각각 토피하중과 유사 또는 최대 약 19% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 또한 수평토압은 천단부에서 좌우측 측벽부까지의 수평토압 분포는 정지토압 분포와 유사한 분포를 보이나, 좌우측 측벽부 하부에 작용하는 수평토압은 콘크리트 라이닝과 굴착사면 사이의 좁은 공간에서의 되메움 특성으로 인하여 점차 감소하여, 정지토압에 비하여 굴착사면 구배가 1:0.5~1인 경우 최대 약 46%, 굴착사면 구배가 90°인 경우 최대 약 64% 정도 감소하는 것으로 나타났다.
3. 복개 구조물과 굴착사면 사이의 좁은 공간에서의 되메움 특성에 의하여 아치형 복개 터널구조물에 정지토압 조건 보다 작은 수평토압이 작용하는 것으로 나타났다. 이 경우 토피하중보다 작은 연직토압 작용시에는 작용 토압감소에 따른 경제적인 콘크리트 라이닝의 설계가 이루어질 수 있으나, 토피하중 보다 큰 연직토압이 작용하는 경우에는 수평토압에 의한 횡방향 구속력이 상대적으로 저하되므로 이에 따른 사용성에 대한 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 배규진, 이두화, 장수호, 김영근 (2003), 슛크리트 라이닝의 거동해석에 영향을 미치는 입력변수들에 대한 민감도분석, 大韓土木學會論文集, 대한토목학회, 제 23권, 제 5C호, pp. 345-356.
2. 배규진, 정형식, 이규필 (2003), 복개 터널구조물에 작용하는 편토압 고려를 위한 수치해석적 연구, 한국터널공학회 학술논문집 터널기술, 한국터널공학회, Vol. 5, No. 3, pp. 227-239.
3. 배규진, 이규필 (2001), 복개터널 라이닝 해석을 위한 모델링 기법에 관한 연구, 한국터널공학회 학술논문집 터널기술, 한국터널공학회, Vol. 3, No. 2, pp. 13-22.
4. 문창열 (1999), 비대칭 좁은 공간에서의 되메움 토압에 관한 연구, 韓國地盤工學會論文集, 한국지반공학회, 제 15권, 제 4호, pp. 261-277.
5. 문창열, 이종규 (1997), 좁은 공간 되메움 지반에서 상재

- 하중 영향에 의한 토압, 韓國地盤工學會論文集, 한국지반공학회, 제 13권 제 6호, pp. 165-177.
6. 정성교, 정진교, 이만렬 (1997), 안정사면에 인접한 옹벽에 작용하는 수평토압, 韓國地盤工學會論文集, 한국지반공학회, 제 13권 제 5호, pp. 19-34.
  7. 정성교, 조기영, 윤치관, 이대명 (1996), 되메움(굴착)의 형상에 따라 매설박스에 유발되는 토압, 韓國地盤工學會論文集, 한국지반공학회, 제 12권 제 5호, pp. 27-40.
  8. 이규필, 이석원, 박시현, 배규진 (2002), 복개 터널구조물의 역학적 거동 영향인자 분석을 위한 수치해석적 연구, 2002년도 복합술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 703-710.
  9. 유건선 (1997), 실험 및 수치해석에 의한 복개터널 주위의 지압 및 터널 복공의 역학적 거동에 관한 연구, 박사학위논문, 서울대학교.
  10. 이석원 등 (2002), 복개 터널구조물의 거동해석 및 설계요소기술개발, 연구보고서, 건기연 2002-055, 한국건설기술연구원
  11. 문홍득 등 (1998), 국내 터널설계 기술력 향상을 위한 신기술 연구 (I), 연구보고서, 건기연 98-009, 한국건설기술연구원.
  12. 東田 淳, 三笠正人 (1986), 彈性論による埋設管の土壓の検討, 土木學會論文集, 日本土木學會論文集, 日本土木學會, 第 376号 III-6, pp. 181-190.
  13. 村田恒雄, 山田清臣 (1989), 開削公法による剛性埋設管の設計法に關する研究, 日本土木學會論文集, 日本土木學會, 第 409号 VI-11, pp. 103-112.
  14. Saltelli, A. and Sobol, I.M. (1995), About the use of rank transformation in sensitivity analysis of model output, *Reliab. Engng. Syst. Safety.*, Vol. 50, pp. 225-239.
  15. Kellogg, C.G. (1993), Vertical earth loads on buried engineering works, *Journal of geotechnical engineering*, Vol. 119, No. 3, pp. 487-506.
  16. Helton, J.C. (1993), Uncertainty and sensitivity analysis techniques for use in performance assessment for radioactive waste disposal, *Reliab. Engng. Syst. Safety*, Vol. 42, pp. 327- 367.
  17. Sam Frydman, Israel Keissar (1986), Earth pressure on retaining walls near rock faces, *Journal of geotechnical engineering*, Vol. 113, No. 6, pp. 586-599.
  18. Handy, R. L. (1985), The arch in soil arching, *Journal of geotechnical engineering*, Vol. 111, No. 3, pp. 302~318.
  19. Saltelli, A., Chan, K. and Scott, E.M. (2000), *Sensitivity analysis*, John Wiley & Sons Ltd., England.
  20. Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F. (1995), *Support of Underground Excavations in Hard Rock*, pp. 8-19, A.A. Balkema, Rotterdam.
  21. Conover, W.J. (1980), *Practical Nonparametric Statistics*, 2nd ed., Wiley, New York.



**배규진**

한국건설기술연구원 지반연구부  
연구부장  
gjbae@kict.re.kr



**정형식**

한양대학교 토목공학과 교수  
chunghs@ihanyang.ac.kr

---



**이규필**

한국건설기술연구원 지반연구부 연구  
원, 한양대학교 토목공학과 박사과정  
freely@kict.re.kr

---