

터널 설계조건을 고려한 하중분배율의 정량적 산정에 관한 연구

- ring-cut 굴착공법을 중심으로 -

A Study on the Quantitative Evaluation of the Load Distribution Factors

Considering the Design Conditions of Tunnel

- Especially for the Ring-cut Excavation Method -

장 석 부*¹

Chang, Seok - Bue

문 현 구*²

Moon, Hyun - Koo

Abstract

2-D numerical methods have been applied to analyze the stability of tunnels because of computation efficiency, though the ground around the tunnel under construction shows 3-D deformational behaviour due to the transverse and longitudinal arching effects. Load distribution factors are introduced to the 2-D analysis for the consideration of the effects of the tunnel advance in three dimensions. The load distribution factors influence significantly the ground deformation and the load of primary supports like shotcrete and rockbolts. According to the previous studies for 3-D numerical studies, it was shown that load distribution factors were heavily dependent on the ground deformational properties, tunnel size and the advance length of a tunnel. However, as the quantitative methods evaluating the factors have not been presented yet, constant values have been assigned to the factors for 2-D analysis even if the conditions for tunnel design are different. Accordingly, this paper presents the method to evaluate quantitatively the load distribution factors through the regression analysis of 3-D analysis data on 72 design cases. Also, new modification to the load distribution factors are suggested for the ring-cut excavation method because the conventional 2-D analysis is not able to consider the support effects of the core left on the tunnel face.

요 지

공사중 터널은 막장부의 종방향 및 횡방향 아치거동에 의하여 주변 지반은 3차원적 변형거동을 보이나, 터널 안정성 해석에는 전산효율 등의 이유로 2차원 수치해석법이 일반적으로 적용되고 있

*1 정희원, (주) 유신코퍼레이션 건설기술연구소

*2 정희원, 한양대학교 공과대학 지구환경건설공학부 부교수

다. 하중분배율은 터널의 굴진효과를 고려하기 위하여 2차원 해석에 도입된 것으로 지반변위, 슛크리트 및 록볼트와 같은 1차 지보재의 하중 등과 같은 해석결과에 큰 영향을 미친다. 또한, 3차원 해석을 이용한 기존의 연구에 의하면, 지반의 변형특성, 터널크기, 굴진장 등이 하중분배율에 주요한 영향을 미친다는 사실이 입증되었다. 그러나, 설계조건에 대한 하중분배율의 정량적 산정법의 부재로 인하여 실제 해석시에는 설계조건을 무시한 하중분배율이 적용되고 있는 실정이다. 이에, 본 논문에서는 기존 연구(정 대열, 1993)에서 제시한 72개의 3차원 해석결과에 대한 회귀분석을 통하여 하중분배율을 정량적으로 산정할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한, ring-cut공법은 막장의 자립성이 매우 불량한 조건에 적용되는 공법임에도 불구하고 기존의 2차원 해석법으로는 막장코아의 지지효과를 고려하지 못하는 문제점이 있었다. 따라서, 2차원 및 3차원 수치해석을 통하여 ring-cut공법에 대한 기존 해석법의 문제점을 검토하였으며 본 공법에 대한 하중분배율의 보정치를 제시하였다.

Keywords : Tunnel, 2-D analysis, Load distribution factors, Ring-cut excavation method, Numerical technique

1. 서 론

터널설계에 있어서 수치해석기법은 터널의 안정성과 터널 굴착에 의한 주변 지반의 영향을 평가하는 주요 해석도구로서 자리잡고 있으며, 그 중요성과 활용도는 점차 높아가고 있다. 그러나, 수치해석기법의 급격한 발전 및 보급에도 불구하고 현재 국내에서 일반적으로 적용되고 있는 획일적인 하중분배율을 적용한 2차원 터널수치해석기법은 터널의 굴착공법 및 원지반의 특성을 고려할 수 없는 문제점을 가지고 있다. 이 문제점은 3차원 터널수치해석을 통하여 극복될 수 있으나 3차원 해석은 입력자료의 작성이 난해하고 해석결과량이 방대하며 과도한 전산용량이 요구되는 문제점을 내포하고 있기 때문에 주로 터널 교차부와 같은 3차원 형상의 문제에 제한적으로 적용되고 있는 실정이다.

일반적으로 터널 지보설계는 표준지보패턴의 설계, 지질조건에 따른 적정 지보패턴의 적용, 수치해석에 의한 검토 등으로 구성된다. 표준지보패턴의 설계는 크게 슛크리트 두께, 록볼트 길이 및 타설간격 등의 지보재 수량과 분할굴착과 굴진장 등의 굴착공법으로 대별된다.

현재의 2차원 수치해석기법에서 표준지보패턴의 지보재 수량과 분할 굴착은 충분히 고려되고 있으나, 종방향 굴진장은 전혀 고려되지 않고 있는 실정이다. 이는 터널 굴진장이 다른 경우에도 동일한 지보량 및 분할 굴착공법이 적용되었다면 동일한 해석결과가 산출됨을 의미하는 것으로 이것은 굴진장이 막장의 안정성과 밀접한 상관성을 가지고 있다는 주지의 사실을 해석상에서 무시하는 것이다. 이러한 배경에서 터널의 굴진과정을 고려한 3차원 수치해석을 통하여 2차원 해석상에서 적용되고 있는 하중분배율에 미치는 제반 영향인자들에 대한 연구가 시도된 바 있다(문 현구, 1997; 정 대열, 1993; 최 항식, 1994). 이러한 연구는 하중분배율에 가장 큰 영향을 미치는 요소로써 터널의 굴진장, 지반물성치 등을 들고 있으나 터널의 제반 조건에 대하여 하중분배율을 정량적으로 결정할 수 있는 방법은 제시하지 못하였다.

터널설계시 연약한 지반에 적용되는 굴착공법으로는 중벽식 또는 CD(central diaphragm)공법, silot공법, ring-cut공법 등을 들 수 있다(신 창범, 1995). 전자의 두 공법은 굴착폭을 감소시키기 위하여 단면을 평면분할하는데 비

하여 ring-cut공법은 막장부에 지지 코아(core)를 남겨 두므로써 종방향 지지력을 향상시키는 효과를 갖는다. 그러나, 2차원 해석에서는 지지 코아의 효과를 반영하기 어렵기 때문에 막장 안정을 위한 설계의도를 수치해석에서 고려하지 못하므로써 ring-cut 공법을 2차원 해석에 적절히 고려할 수 있는 방법이 요구된다.

본 논문에서는 이러한 어려움을 극복할 수 있는 한 방법으로써 터널설계의 제반여건에 따른 하중분배율을 정량적으로 결정할 수 있는 방법을 제시하였다. 터널의 굴진장과 원지반의 특성을 고려한 하중 분담율의 산정식을 구하기 위하여 기존 연구의 3차원 해석결과(정 대열, 1993)에 대한 회귀분석을 하였다. 또한, ring-cut 굴착 공법에 대한 현재의 평면분할에 의한 2차원 해석을 통하여 지지코아의 효과가 반영될 수 있는지를 검토하였으며, 3차원 수치해석을 통하여 지지코아에 의한 효과를 분석하였고 하중분배율의 보정치를 제시하였다.

2. 하중 분배율

터널굴전에 의하여 터널 주변 지반에는 그

림 1과 같이 횡방향 아치와 막장부의 종방향 아치효과가 발생하기 때문에 엄밀하게는 터널 해석에 2차원 평면변형율 조건이 적용될 수 없다. 원칙적으로 터널안정성 평가에는 3차원 수치해석이 적용되어야 하나 3차원 해석은 2차원 해석에 비하여 상당한 경비와 노력이 소요되는 문제가 있다. 따라서 평면변형율 조건에서 종방향 아치효과와 숏크리트의 경화시간을 고려하여 굴착에 의하여 발생한 총하중을 굴착, 연성 숏크리트(soft shotcrete), 경성 숏크리트(hard shotcrete)의 각 단계로 분배하는 방법이 사용되고 있으며 이를 하중분배율이라 한다.

하중분배율을 수치해석에 적용하는 방법에는 강성변화모델(stiffness variation model), 하중분배모델(stress distribution model), 내부 압력 조절법 등이 있다. 강성변화모델은 굴착단면 내부의 강성을 변화시키는 방법이고, 하중분배모델은 굴착상당력에 하중계수를 곱하여 적용하는 방법으로 전역강성 행렬 $[K]$, 절점 변위벡터 $\{u\}$, 절점하중벡터 $\{f\}$ 에 대하여 $[K]\{u\}=\{f\}$ 의 식으로 표현되는 유한요소법을 예로 들 수 있으며 $\{f\}$ 에 하중계수를 곱하여 하중분배율을 조정한다. 내부 압력조절법은 굴착

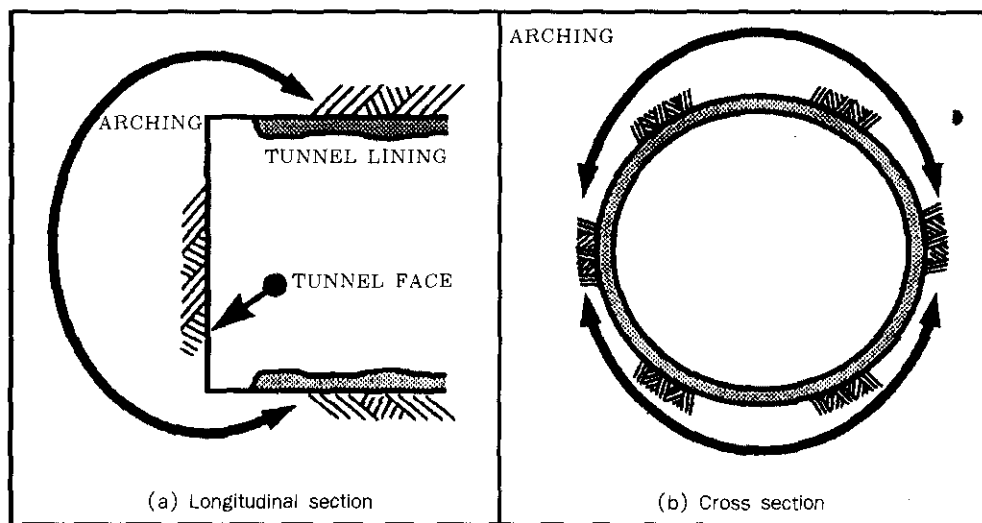


그림 1. 터널굴착에 의한 종방향 및 횡방향 아치현상

에 의하여 굴착면에 발생한 불평형력(unbalanced force)의 반대방향 하중을 굴착면에 작용시키는 방법으로 FLAC(Itasca, 1995)과 같은 explicit scheme의 유한차분법에서 적용되고 있다. 이 중, 강성변화모델은 터널변위 발생 양상이 실제 계측결과 및 3차원 해석결과와 큰 차이가 있으므로 현재는 후자의 두 방법이 적용되고 있다(최항석, 1994; Sinha, 1989).

터널의 표준지보설계는 암반분류법에 따라 지질조건을 분류한 후, 각 조건에 따라 분할굴착, 1회 굴진장, 슛크리트 두께, 록볼트 배치 등을 계획하여 일반적으로 5~6개 정도의 지보패턴을 결정한다. 이로부터 설계구간 내의 지질조건, 인접구조물 여부, 지형적 조건 등의 구간별 특성에 따라 해당 구간에 적합한 지보패턴을 적용하며, 이 과정은 설계자의 경험과 같은 정성적인 요소에 많은 영향을 받는다. 해당 구간에 적용된 터널의 안정성 및 터널굴착에 의한 주변 지반의 영향은 유한요소법, 유한차분법과 같은 수치해석법으로 검토된다. 이때, 슛크리트, 록볼트와 같은 지보재는 정량적으로 정확하게 수치해석 모델에 적용되며 분할굴착 또한 단계적 해석으로 고려된다. 그러나 터널의 굴착, 연성 및 경성 슛크리트에 대한 하중분배율은 모든 지보패턴과 지반조건에 대하여 동일하게 적용되기 때문에 막장부의 초기 변위에 지대한 영향을 미치는 굴진장은 전혀 고려되지 않고 있다. 또한 지반의 변형특성은 하중분배율에 큰 영향을 미침에도 불구하고 정량적 판단근거가 부족하여 적용되지 않고 있는 실정이다. 국내에서 터널수치해석에 적용되고 있는 대표적 하중분배율은 40%-30%-30%, 50%-25%-25% 등이나 이론적 근거는 미약하여 논란의 소지가 많은 실정이다.

3. 터널설계조건에 따른 하중분배율 산정

하중분배율에 미치는 영향요소로는 터널의 크기, 토피, 단면 형상, 굴진장, 지보량 등의 설계 조건과 지반의 변형 및 강도특성 등의 지질

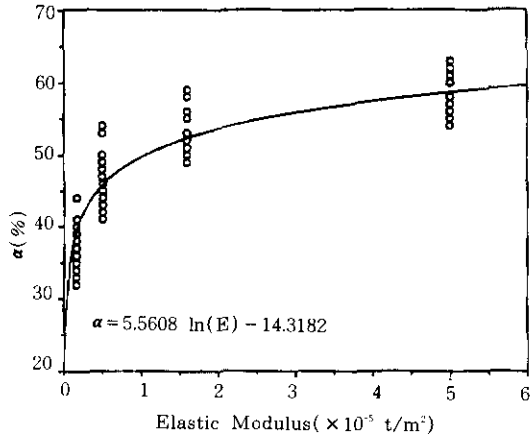
조건을 들 수 있으나 3차원 해석을 통한 연구 결과에 의하면, 터널의 크기(D), 일일 굴진장(L), 슛크리트 두께(T) 및 지반의 탄성계수(E)가 주요 영향요소임이 밝혀졌다. 특히, 이 4개의 주요 영향인자의 조합에 대한 72경우의 3차원 수치해석을 통하여 각 경우에 대한 굴착(α)-연성스�크리트(β)-경성스�크리트(γ)단계에 대한 하중분배율이 부록 A와 같이 제시된 바 있다(정 대열, 1993).

3차원 해석조건은 전단면 굴착의 원형터널에 대한 것으로 터널크기는 일반적인 지하철 단선과 복선정도이며 지반조건은 풍암반에서 경암반 정도의 범위이다. 3차원 해석결과로부터 하중분배율을 산정하는 기준은 지반응력, 지보재 하중, 터널변위 등을 들 수 있으나 슛크리트의 최대 축력을 기준으로 하였다. 원칙적으로 하중분배율의 산정에는 지반응력과 터널변위가 적용되어야 하나 심도가 낮은 터널의 경우에는 천정부와 측벽부의 변화가 심하여 터널의 상태를 단일수치로 표현하는데 어려움이 따른다. 반면에, 원형터널에서 슛크리트의 최대 축력은 터널변위의 크기 및 변형양상에 지배되므로 지반의 거동을 대표하는 단일수치로 볼 수 있으므로 적절한 기준으로 판단된다.

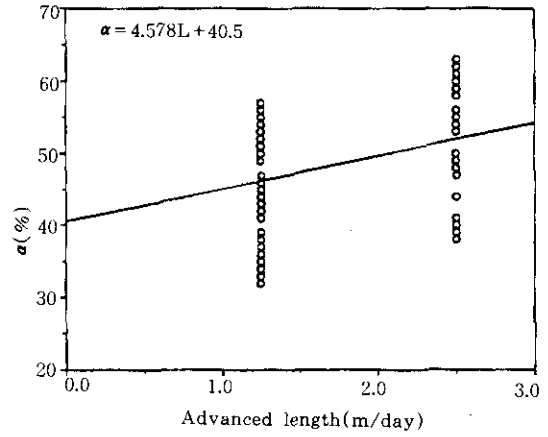
정대열(1993)의 연구결과에 의하면, α 는 E와 L에 주요 영향을 받으며 γ 는 L과 D에 주로 지배되고 있으나, T의 영향은 미소함을 알 수 있다. $\alpha + \beta + \gamma = 100\%$ 이므로 β 는 α 와 γ 의 수치로부터 간단하게 구해질 수 있다. 그림 2는 하중분배율과 해석조건의 민감도를 분석하기 위하여 각 설계변수에 대한 72경우의 해석결과를 나타낸 것으로 α 는 E와 L에 대하여 각각 로그합수형과 선형의 비례관계를 보이며 γ 는 L과 D에 대하여 각각 선형의 반비례와 비례관계를 보임을 알 수 있다. 이에 α 와 γ 에 대한 회귀분석식을 다음과 같이 설정하였다.

$$\alpha = a L + b \ln E \quad (1)$$

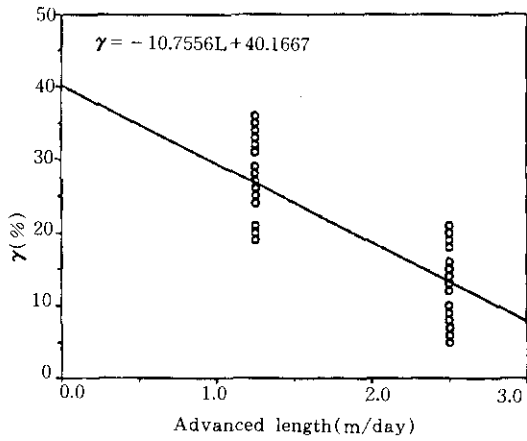
$$\gamma = c L + d D \quad (2)$$



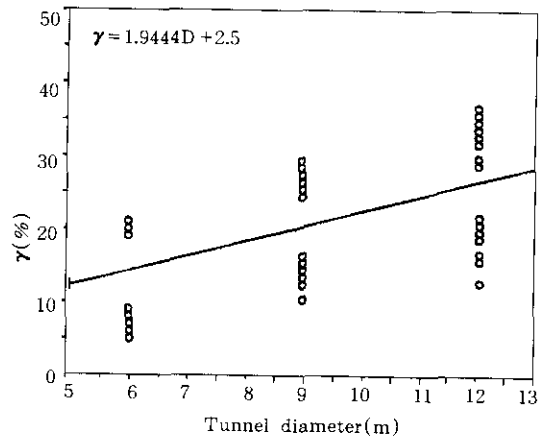
(a) α -E의 상관관계



(b) α -L의 상관관계



(c) γ -L의 상관관계



(d) γ -D의 상관관계

그림 2. 지반조건, 굴진장, 터널크기와 하중분배율의 상관성

식(1)과 (2)의 계수 a, b, c, d를 최소자승법 (least square method)으로 구하기 위하여 다음과 같은 목적함수를 설정하였다.

$$\phi_{\alpha} = \sum_{i=1}^{72} [\alpha_i - (a \cdot L_i + b \cdot \ln E_i)]^2 \quad (3)$$

$$\phi_{\gamma} = \sum_{i=1}^{72} [\gamma_i - (c \cdot L_i + d \cdot D_i)]^2 \quad (4)$$

위 식에서, 아래 첨자 i는 부록 A의 3차원 해석결과치를 의미한다.

식(3)과 (4)의 함수값이 최소가 되기 위해서는 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$\frac{\partial \phi_{\alpha}}{\partial a} = \frac{\partial \phi_{\alpha}}{\partial b} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi_{\gamma}}{\partial c} = \frac{\partial \phi_{\gamma}}{\partial d} = 0 \quad (6)$$

식(5)와 (6)을 행렬식으로 정리하면, 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{72} L_i^2 & \sum_{i=1}^{72} L_i \ln E_i \\ \sum_{i=1}^{72} L_i \ln E_i & \sum_{i=1}^{72} (\ln E_i)^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{72} \alpha_i L_i \\ \sum_{i=1}^{72} \alpha_i \ln E_i \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{72} L_i^2 & \sum_{i=1}^{72} L_i \ln D_i \\ \sum_{i=1}^{72} L_i \ln D_i & \sum_{i=1}^{72} (\ln D_i)^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{72} \gamma_i L_i \\ \sum_{i=1}^{72} \gamma_i D_i \end{pmatrix} \quad (8)$$

식(7)과 (8)로부터, 식(9)와 (10)의 결과를 얻었으며, 본 추정식의 표준편차는 α 의 경우 3.24, γ 의 경우 5.07로써 부록 A의 3차원 해석 결과와 잘 일치하는 결과를 얻었다.

$$\alpha = 3.340 L + 3.778 \ln E \quad (9)$$

$$\gamma = -3.126 L + 3.391 D \quad (10)$$

원형이 아닌 터널에 대하여 식(10)을 적용할 때, D의 값으로는 터널폭이나 높이 중 최대치를 적용하거나 동가단면적에 대한 환산직경을 적용할 수 있으나, 전자는 값이 다소 과도한 경향이 있고 후자는 터널의 구조적 형상을 고려하지 못하는 단점이 있다. 본 논문에서는 터널 주변장에 대한 동가원주로부터 환산된 직경을 적용할 것을 추천한다. 이 방법은 동일한 단면적일지라도 터널폭과 높이의 비가 커서 원형의 형상과 차이가 큰 경우에는 더 큰 환산직경이 산출됨으로써 터널의 구조적 형상을 어느 정도 고려할 수 있는 장점이 있다.

4. Ring-cut공법의 하중분배율 결정

4.1 기존 해석방법의 문제점

Ring-cut공법은 막장부에 지지코어를 남기고 굴착하는 공법으로 불량한 지반조건의 경우에 막장면의 안정을 도모하기 위하여 적용되는 공법이며, 본 공법에 대한 기존의 2차원 수치

해석 과정은 bench-cut공법과 동일한 하중분배율을 적용하되 지지코어는 지보 설치가 종료된 후에 제거된다. 그러나, 수치해석 경험에 의하면 이 방법은 막장코어의 지지효과를 전혀 고려할 수 없기 때문에 본 논문에서는 이를 검토하기 위하여 다음과 같은 2차원 수치해석을 수행하였다.

동일한 지반조건 및 단면형상에 대하여 ring-cut 공법과 bench cut 공법 및 silot 굴착공법에 대한 터널수치해석 결과를 비교하기 위하여 상반이 반경 5 m인 반원형 터널을 설정하였다. 터널지보재로써는 25cm두께의 슛크리트만을 적용하였으며 슛크리트의 탄성계수로는 연성스�크리트와 경성스�크리트에 대하여 각각 $0.5 \times 10^6 \text{t/m}^2$ 와 $1.5 \times 10^6 \text{t/m}^2$ 을 적용하였다. 각 굴착공법에 따른 해석순서는 그림 3과 같으며 하중분배율은 모든 경우에 40%-30%-30%를 적용하였다.

풍화암 정도의 지반 물성에 대한 탄소성 특성을 표 1의 두 경우로 가정하였으며, 또한 토피(H)를 10m, 15m, 20m로 가정하여 터널해석을 수행하였다.

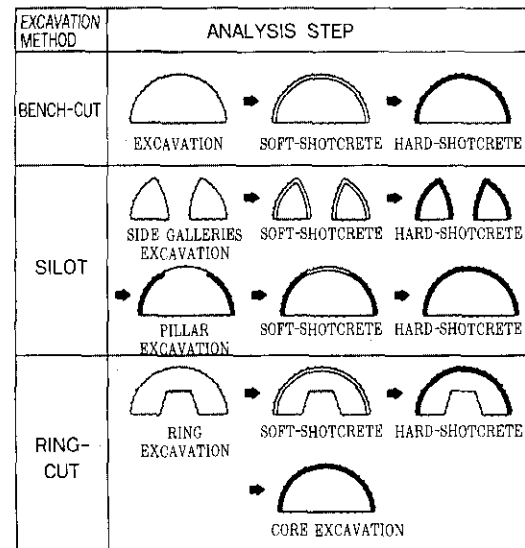


그림 3. 굴착공법별 해석 순서.

표 1. 수치해석을 위한 풍화암반의 물성치.

	탄성계수	포아송비	단위중량	접착력	내부마찰각	인장강도
CASE (I)	10000 t/m ²	0.34	2.1 t/m ²	20 t/m ²	35°	5 t/m ²
CASE (II)	5000 t/m ²	0.34	2.1 t/m ²	10 t/m ²	35°	1 t/m ²

표 2. 다양한 지반조건에서 굴착공법에 따른 수치해석 결과

구 분		Bench-cut method	Silot method	Ring-cut method	
Case (I)	H = 10m	천단변위	1.518cm	1.422cm(-5.0%)	1.532cm(+0.9%)
		지표침하	0.942cm	0.892cm(-5.3%)	0.951cm(+1.0%)
	H = 15m	천단변위	2.213cm	2.043cm(-7.7%)	2.226cm(+0.6%)
		지표침하	1.156cm	1.110cm(-4.0%)	1.165cm(+0.8%)
	H = 20m	천단변위	2.859cm	2.651cm(-7.3%)	2.864cm(+0.2%)
		지표침하	1.270cm	1.225cm(-3.5%)	1.273cm(+0.2%)
Case (II)	H = 10m	천단변위	2.960cm	2.917cm(-1.5%)	2.984cm(+0.8%)
		지표침하	1.847cm	1.761cm(-4.7%)	1.864cm(+0.9%)
	H = 15m	천단변위	4.344cm	4.120cm(-5.2%)	4.386cm(+1.0%)
		지표침하	2.290cm	2.217cm(-3.2%)	2.318cm(+1.2%)
	H = 20m	천단변위	5.669cm	5.271cm(-7.0%)	5.684cm(+0.3%)
		지표침하	2.567cm	2.477cm(-3.5%)	2.577cm(+0.3%)

수치해석 프로그램으로는 FLAC을 사용하였으며, 해석결과 중에서 각 굴착공법의 효과를 검토하는 기준으로는 천단변위와 지표침하를 설정하였다. 이는 각 터널은 굴착단계에서 각기 다른 기하학적 형상을 하고 있기 때문에 특정 위치 또는 최대 지보재 하중을 검토 기준으로 설정하기 어렵기 때문이다. 또한, ring-cut 공법과 silot 공법은 주로 저심도의 지반조건이 좋지 않은 터널에 적용되는 공법으로써 지보재 하중보다는 지반변위 억제가 주목적임을 고려한 것이다.

각 조건에 대한 해석결과는 표 2와 같으며 ()안의 수치는 bench-cut을 기준으로하여 변위차를 백분율 한 것이다. Bench-cut공법에 비하여 silot공법은 1.5~7.7%의 천단변위와 3.2%~5.3%의 지표침하 저감효과를 얻었으나 ring-cut공법의 경우에는 해석상 차이가 1%미만에 불과하며 오히려 더 큰 변위가 발생하였

다. 이 결과는 단면분할에 의한 2차원 해석법으로는 막장 코아의 종방향 지지효과를 고려할 수 없으므로 ring-cut공법의 효과를 적절히 반영할 수 있는 방법이 요구됨을 의미하는 것이다.

4.2 3차원 해석에 의한 하중분배율 결정

4.2.1 모델설정 및 해석과정

Ring-cut공법과 bench-cut공법의 차이를 분석하기 위하여 터널상반에 대한 3차원 수치해석 모델을 그림 4와 같이 설정하였다. 터널반경은 5m, 토피는 20m, 슛크리트의 두께는 25cm이고 코아의 반경은 3m와 4m, 코아길이는 2m와 4m로써 코아단면적비(코아단면적/터널단면적) R은 0.36과 0.64이다. 지지코아의 단면형상은 일반적으로 사다리꼴이나 요소망 생성의 편의를 위하여 반원형으로 하였다. 초기응력조건으로는 자중에 의한 연직응력과 0.5

의 축압계수를 적용하였고 경계조건으로는 하부의 연직변위와 측부의 수평변위를 구속하였다. 지반물성은 풍화토 및 풍화암 정도를 대상으로 하여 탄성계수는 10000t/m^2 와 20000t/m^2 의 두 경우를 설정하였으며, 그 외 다른 물성으로써 포아슨비는 0.34로 하였고, 점착력, 내부마찰각과 인장강도는 각각 26t/m^2 , 33° 와 5t/m^2 로 하였다. 본 모델에 대한 수치해석에는 3차원 유한차분법 프로그램인 FLAC3D (Itasca, 1996)를 이용하였다.

Bench-cut 및 ring-cut공법과 두 종류의 지반 물성치에 대하여 총 10경우에 대한 3차원 해석을 수행하였다. 전산시간의 절약 및 터널 입구부의 경계효과를 방지하기 위하여 터널 굴진과정을 굴착이 완료된 지보터널구간(A구간, 연장 20m)과 단계적 굴착 및 지보가 적용되는 구간(B구간, 연장 10m)으로 분할하였다. 즉, 먼저, 20m의 A구간을 굴착한 후, B구간은 총 10회에 걸쳐서 1m씩 굴착되고, 한 막장 앞 단계는 연성숏크리트가 타설되며 2막장 앞 단계의 숏크리트는 경성숏크리트로 치환된다. 굴착 공법에 따라 10단계의 굴착이 완료된 최종 상태의 유한차분 요소망은 그림 5와 같다.

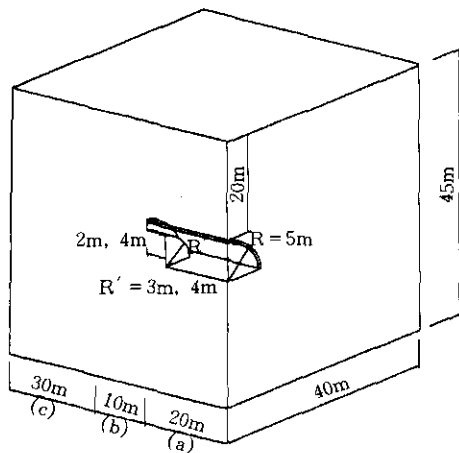
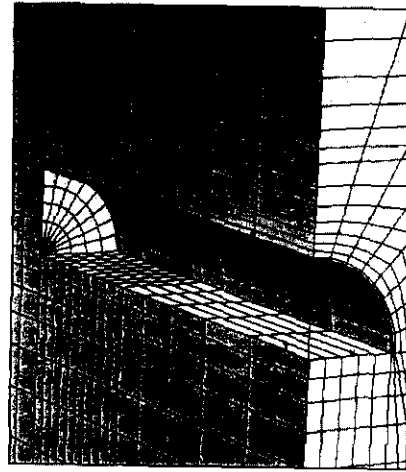
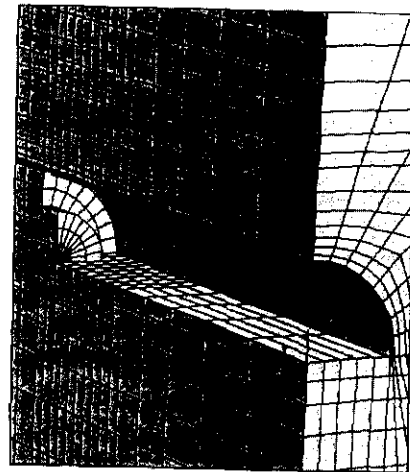


그림 4. 3차원 터널해석 모델



(a) Bench-cut



(b) Ring-cut

그림 5. 터널굴착 및 지보 후의 유한차분요소망

4.2.2 해석결과

각 경우에 대한 3차원 수치해석 결과, 지지코아의 단면적은 해석결과에 중요 영향요소임이 밝혀졌으나, 코아의 길이는 해석결과에 거의 영향을 미치지 않았다. 실제 터널공사시에는 코아의 길이가 길어지면, 락볼트 타설 및 추가 굴착공사가 어렵기 때문에 코아는 2~3막장 정도까지만 남겨둔다. 또한, ring-cut공법이 적용되는 지반조건에서의 1회 굴진장이

0.8m~1m임을 고려하면 코아의 길이는 약 2m 내외로 고정되므로 설계변수가 되지 않음을 알 수 있다. 따라서, 코아의 길이가 4 m인 경우의 해석결과는 분석대상에서 제외하였다.

지반물성치 및 코아단면적비에 따른 막장으로부터의 이격거리별 천단변위의 발생양상은 그림6과 같다. 지반의 탄성계수가 낮은 경우에는 변형수렴부가 막장에서 후방으로 더 이격된 위치에서 형성됨을 볼 수 있으며, 동일한 탄성계수가 적용된 경우에는 코아의 크기 및 유무에 큰 차이 없이 굴착부 이후부터의 변위증가 양상이 유사하여 수렴된 최종 변위의 차이는 미소하였다. 그러나, 막장면의 변위는 코아가 있는 경우에 절반정도로 감소하였고 지반의 탄성계수와 무관하게 막장전방의 변위가 크게 억제되었다. 이는 무지보 상태의 막장 안정성을 도모하는데 있어서 막장코아가 상당한 지지효과를 가지고 있음을 입증하는 결과라 할 수 있다.

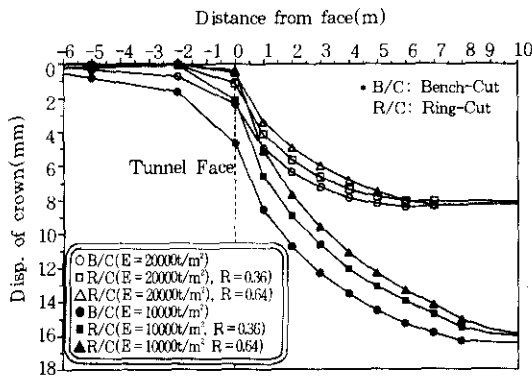


그림 6. 굴착공법 및 지반조건에 따른 막장으로부터 이격거리별 천단변위

표 3은 코아의 지지효과를 정량적으로 분석하기 위하여 각 해석조건에 대한 천단변위 결과를 이용하여 하중분배율을 구한 것이다. 굴착부와 연성 슛크리트부의 변위 측정위치는 첫 번째 막장과 두 번째 막장의 중심부로서 변위의 크기는 양 절점의 평균치를 취하였고 경성 슛크리트부의 변위는 최종 수렴된 변위로 하였다.

코아가 있는 경우에 α 는 최소 10%에서 최대 23%가 감소하였고, γ 는 최소 6%에서 최대 18%가 증가하여 변화폭이 컸으나, β 는 최대 5% 정도의 증가로 변화폭은 상대적으로 미소하였다. 그림 7은 코아의 단면적비(R)에 따른 α 와 γ 의 변화를 나타낸 것으로 각각 선형 반비례와 선형 비례의 관계를 보여주고 있다. 코아가 클수록 막장부의 변위는 더 크게 감소하였

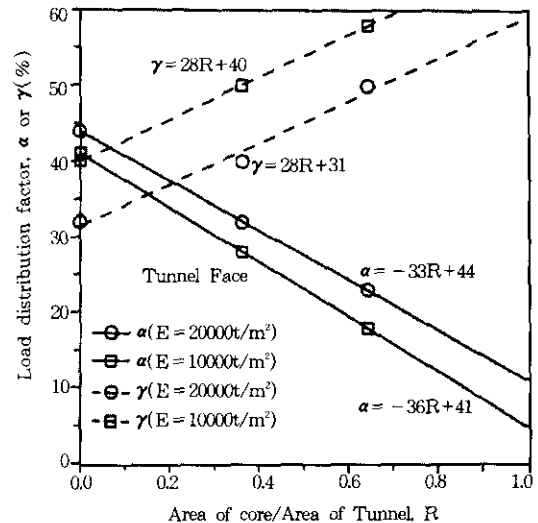


그림 7. 각 지반조건별 코아면적비(R)에 따른 α 와 γ 의 변화

표 3. 3차원 해석결과에 의한 bench-cut공법과 ring-cut 공법에 대한 하중분배율

구	분	Bench-Cut	Ring-Cut(R=0.36)	Ring-Cut(R=0.64)
E=10000 t/m ²	천단변위(mm)	6.6 - 9.6 - 16.2	4.3 - 7.7 - 15.4	2.7 - 6.3 - 14.9
	$\alpha - \beta - \gamma$	41% - 19% - 40%	28% - 22% - 50%	18% - 24% - 58%
E=20000 t/m ²	천단변위(mm)	3.6 - 5.6 - 8.3	2.6 - 4.9 - 8.0	1.9 - 4.1 - 8.3
	$\alpha - \beta - \gamma$	43% - 24% - 33%	33% - 28% - 39%	23% - 27% - 50%

고 경성 숯크리트가 받는 하중분배율은 더 크게 증가하였다. 이는 코아의 크기가 클수록 터널 종방향의 아치효과가 증가하여 굴착하중이 지보재가 타설된 막장부 후방으로 전이됨을 의미한다.

이 결과는 ring-cut공법에 대한 2차원 수치 해석시에는 코아의 크기에 따라 α 는 (33~36)R 만큼을 감소시키고, γ 는 28R 만큼을 증가시키는 하중분배율의 보정이 필요함을 보이고 있다.

6. 결 론

하중분배율은 2차원 터널해석에서 3차원 해석의 효과를 고려하기 위하여 도입된 것으로 터널해석분야에 고유하게 적용되어 왔으며 해석결과에 큰 영향을 미치는 입력요소이다. 기존 연구의 3차원 터널해석에 의하면 지반조건, 터널설계 조건 등과 같은 요소들이 하중분배율에 큰 영향이 있음이 입증되었으나, 해석조건에 적절한 하중분배율의 정량적 산정기준의 부재로 인하여 해석조건과 무관하게 획일적인 수치를 적용하는 실정이다. 이는 터널 안정성을 향상시키기 위하여 굴진장을 줄이거나 지지코아를 남겨두는 등의 설계사항이 2차원 해석에 적절히 반영되지 않음을 의미한다.

이에, 본 연구에서는 3차원 해석결과를 이용하여 지반조건, 굴진장, 터널크기, 지지코아 유무 등과 같은 터널 해석 조건을 2차원 해석에 반영할 수 있도록 적절한 하중분배율을 정량적으로 산출할 수 있는 방법을 제시하였다. 3차원 해석은 많은 시간과 노력이 소요되므로 지반조건, 굴진장, 터널크기에 대한 하중분배율 산정에는 기존의 해석결과를 이용하였다. 즉, 해석결과에 대한 민감도 해석을 통하여 관계식을 설정하고 이에 대한 회귀분석을 수행하여 계수들을 산출하였다. 회귀분석식에 의한 하중분배율은 α 의 경우 3.24, γ 의 경우 5.07의 표준편차를 보이므로써 3차원 해석결과와 잘 일치하였다. 또한, 본 연구에서는 현재와 같은

ring-cut 공법의 2차원 해석법은 지지코아의 효과를 전혀 반영할 수 없음을 입증하였으며, 일련의 3차원 해석결과와의 분석을 통하여 지지코아의 크기에 따른 하중분배율의 정량적 보정 방법을 제시하였다.

본 연구결과는 터널이 단일지층에 위치하고 전단면 굴착, 상반굴착과 같이 교란되지 않은 원지반을 굴착하는 조건에 대한 것이다. 따라서, 터널막장이 복합지층으로 구성되거나 선행굴착에 의하여 교란된 지반을 후행터널이 굴진하는 경우 등에 대한 하중분배율 산정법에 관한 연구가 뒤따라야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구를 위하여 3차원 해석에 도움을 준 SOC건설엔지니어링의 이 승도군과 본 연구의 필요성을 인정해 주고 격려해 주신 많은 분들께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 문현구, 백승한, 박상찬(1997) 합리적인 터널 해석을 위한 요소기술 연구, 한양대학교, 한국건설기술연구원, p.186.
2. 신창범(1995), "토피가 얇은 영동포고가도로 하부터널공사", 대한토목학회지, 제43권, 제2호, pp.38~49.
3. 정대열(1993), "터널막장 주위의 3차원적 영향을 모사하는 2차원 해석 모델의 하중분배율에 관한 연구", 박사학위논문, 서울대학교, p.109.
4. 최항석(1994) "응력집중을 고려한 터널의 3차원 거동에 관한 연구", 석사학위논문, 고려대학교, p.112.
5. Itasca Consulting Group(1995), FLAC(ver. 3.3) Manual, Minnesota, U.S.A.
6. Itasca Consulting Group(1996), FLAC3D(ver. 1.1) Manual, Minnesota, U.S.A.
7. Sinha, R.S.(1989) Underground Structures : Design and Instrumentation, Elsevier, (접수일자 1998. 2. 13)

부록 A. 중요 설계변수에 따른 하중 분담율(정대열, 1993)

(a) Group 1 (T=10cm, L=1.25m)

CASE	α	β	γ	Variation
1	39%	41%	20%	$E = 1.6 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
2	38%	34%	28%	$E = 1.6 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
3	38%	28%	34%	$E = 1.6 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$
4	47%	32%	21%	$E = 5.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
5	46%	27%	27%	$E = 5.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
6	45%	22%	33%	$E = 5.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$
7	53%	27%	20%	$E = 1.6 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
8	51%	23%	26%	$E = 1.6 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
9	50%	19%	31%	$E = 1.6 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$
10	57%	24%	19%	$E = 5.0 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
11	55%	21%	24%	$E = 5.0 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
12	54%	18%	28%	$E = 5.0 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$

(b) Group 2 (T=10cm, L=2.50m)

CASE	α	β	γ	Variation
13	44%	49%	7%	$E = 1.6 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
14	44%	41%	15%	$E = 1.6 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
15	44%	36%	20%	$E = 1.6 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$
16	54%	38%	8%	$E = 5.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
17	53%	33%	14%	$E = 5.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
18	53%	29%	18%	$E = 5.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$
19	59%	32%	9%	$E = 1.6 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
20	58%	29%	13%	$E = 1.6 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
21	58%	26%	16%	$E = 1.6 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$
22	63%	29%	8%	$E = 5.0 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
23	62%	28%	10%	$E = 5.0 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
24	62%	26%	12%	$E = 5.0 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$

(c) Group 3 (T=15cm, L=1.25m)

CASE	α	β	γ	Variation
25	37%	44%	19%	$E = 1.6 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
26	36%	37%	27%	$E = 1.6 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
27	35%	31%	34%	$E = 1.6 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$
28	44%	35%	19%	$E = 5.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
29	43%	29%	28%	$E = 5.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
30	42%	23%	35%	$E = 5.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$
31	52%	28%	20%	$E = 1.6 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
32	51%	23%	26%	$E = 1.6 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
33	50%	18%	32%	$E = 1.6 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$
34	56%	25%	19%	$E = 5.0 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
35	54%	21%	25%	$E = 5.0 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
36	54%	17%	29%	$E = 5.0 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$

(d) Group 4 (T=15cm, L=2.50m)

CASE	α	β	γ	Variation
37	41%	53%	6%	$E = 1.6 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
38	41%	45%	14%	$E = 1.6 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
39	41%	40%	19%	$E = 1.6 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$
40	50%	42%	8%	$E = 5.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
41	49%	36%	15%	$E = 5.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
42	49%	32%	19%	$E = 5.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$
43	56%	35%	9%	$E = 1.6 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
44	56%	30%	14%	$E = 1.6 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
45	56%	26%	18%	$E = 1.6 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$
46	61%	31%	8%	$E = 5.0 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
47	60%	28%	12%	$E = 5.0 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
48	60%	25%	15%	$E = 5.0 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$

(e) Group 5 (T=20cm, L=1.25m)

CASE	α	β	γ	Variation
49	34%	46%	20%	$E = 1.6 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
50	33%	38%	29%	$E = 1.6 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
51	32%	32%	36%	$E = 1.6 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$
52	42%	37%	21%	$E = 5.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
53	42%	29%	29%	$E = 5.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
54	41%	25%	34%	$E = 5.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$
55	50%	29%	21%	$E = 1.6 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
56	50%	21%	29%	$E = 1.6 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
57	49%	15%	36%	$E = 1.6 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$
58	55%	25%	20%	$E = 5.0 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
59	55%	17%	28%	$E = 5.0 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
60	54%	11%	35%	$E = 5.0 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$

(f) Group 6 (T=20cm, L=2.50m)

CASE	α	β	γ	Variation
61	40%	55%	5%	$E = 1.6 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
62	39%	47%	14%	$E = 1.6 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
63	38%	42%	20%	$E = 1.6 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$
64	48%	44%	8%	$E = 5.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
65	47%	37%	16%	$E = 5.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
66	47%	32%	21%	$E = 5.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$
67	55%	36%	9%	$E = 1.6 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
68	53%	31%	16%	$E = 1.6 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
69	53%	27%	20%	$E = 1.6 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$
70	60%	31%	9%	$E = 5.0 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 6\text{m}$
71	58%	27%	15%	$E = 5.0 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 9\text{m}$
72	58%	24%	18%	$E = 5.0 \times 10^5 \text{ t/m}^2, D = 12\text{m}$