터널의 3차원 수치해석에서 하중분배율 적용에 관한 연구
A Study on the Application of Load Distribution Factor through the Three-Dimensional Numerical Analysis in Tunnel

윤원섭[1], Won-Sub Yoon, 조철현[2], Chul-Hyun Cho, 박상준[3], Sang-Jun Park,
김종국[4], Jong-Kook Kim, 채영수[5], Young-Su Chae

[1] 수원대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.
[2] 보강 엔지니어링 전무이사, Executive Director, Bokang Engineering.
[3] 수원대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.
[4] 한국건설품질시험원 지반공학센타 팀장, Chief of Geo-Team., Institution of Korea Construction Quality Test&Analysis.
[5] 수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.

SYNOPSIS : In this study, we recognized about application of the load distribution factor for design of tunnel in 3D numerical analysis. Generally, load distribution factor of tunnel is applied to describe 3D arching effect that can not describe when 2D numerical analysis. Through result of 3D numerical analysis, we used to apply in numerical analysis for the load distribution factor that ratio of finally displacement to displacement of construction step. But 3D numerical analysis need to apply to load distribution factor for convenience of numerical analysis. Therefore, we proposed load distribution factor that reduce time and coast. It corrected variable of advanced length in load distribution factor of 3D numerical analysis.

Key words : arching effect, 3D numerical analysis, load distribution factor

1. 서 론

터널의 안정성 분석 시 대부분 굴착단계 및 지보재 설치에 따른 영향과 터널 굴착의 정확한 해석을 위해서는 3차원 해석을 실시하여야 한다. 3차원 해석에서는 많은 요소와 절점이 사용되므로써 계산시간이 길어지고 3차원적 지형을 묘사하기 어려운 단점들이 있어 대부분 2차원 해석을 수행하고 있다. 그러나 2차원 해석에서는 터널 2차원 횡단면의 묘사로 인한 횡방향 아칭효과(arching effect)는 고려되지만 3차원 아칭효과를 제대로 묘사하기 위한 종방향 아칭효과가 고려되지 않아 정확한 해석결과를 얻을 수 없다. 이러한 3차원 아칭효과를 묘사하기 위한 방법으로 굴착 시 주변응력의 3차원 배열은 지반의 강성과 관계된다는 가정하에 지반의 탄성계수를 하중분담율에 따라 적절히 줄여주는 다중요소법(stiffness variation method, Shinha, 1991)과 터널 막장의 진행에 따른 응력상태의 재배열을 직접 터널에 가해서 3차원 효과를 묘사하는 응력분배법(stress distribution method, Shinha, 1991), 그리고 최근 2차원 해석에서 내부압력으로 하중분담율을 조절하는 하중분배율이 많이 사용된다.

터널의 2차원 해석 시 일반적으로 적용되어지는 하중분배율은 3차원 해석을 통한 천단변위의 결과값을 이용하는데, 안정성 분석 시 발생되는 최종변위값과 각 시공단계에서 발생되는 변위값의 비율에 의해 적용된다. 지금까지 터널의 3차원 안정성 분석 시 하중분배율의 적용에 대한 연구는 시공단계 및 종

방향 및 횡방향 아칭효과를 묘사가 가능하여 하중분배율을 적용할 필요가 없어 연구가 수행되지 않았다. 그러나 3차원 해석 시 불필요한 해석시간과 일반적으로 많은 해석이 수행되는 교차구간 등에서의 불필요한 해석구간이 발생되는 경우 해석단계를 줄임으로써 시간과 경비를 줄일 수 있는 하중분배율의 연구가 필요하다. 또한 비탈면 등의 굴착공사의 안정성 분석 시 굴착과 동시에 응력의 해방이 모두 발생되므로 이로 인해 실제 시공되는 보강재의 발생응력과 해석상의 보강재 발생응력이 상이하여 현장에서 발생되는 문제점 보완 및 현장의 지반거동을 제대로 분석할 수 없는 문제점이 발생된다.

따라서 본 연구는 터널의 설계 시 불필요한 해석단계를 간소화하여 3차원 수치해석의 해석시간을 줄일 수 있는 3차원 하중분배율에 대한 연구를 수행하였다. 지반 및 지보량을 통일하고 굴착장만을 수정하면서 수치해석을 실시하였으며 굴착장에 따른 하중분배율 값을 이용하여 3차원 수치해석에서 하중분배율의 적용에 대해 수치해석을 통하여 검증하였다.

2. 하중분배율의 기존 이론

터널 굴진에 따른 터널의 주변 지반응력은 그림 1과 그림 2에서와 같이 응력의 재분배로 인해 종방향 아칭효과와 횡방향 아칭효과가 발생하게 되어 모든 터널이 3차원 수치해석으로 이루어져야 되나 2차원 해석에 비해 시간과 경비가 소요되는 단점으로 실제 터널의 해석에서는 교차부, 갱구부 등의 복잡한 단면의 해석에서만 3차원 해석이 적용이 되는 것이 현실이다. 하지만 2차원 해석에서는 횡방향 아칭효과만 묘사가 되기 때문에 종방향 아칭효과를 고려해 주어야 한다. 종방향 아칭효과를 묘사하기 위한 방법으로는 강성변화모델(stiffness variation method)과 하중분배율모델(stress distribution model) 등이 있으며 최근에는 굴착 단면 내부의 지반 강성을 시공 공정에 의한 구조계 변화에 따라 감소시키는 강성변화모델보다는 막장으로부터 종축 방향으로 떨어진 위치에 따라 종방향 아칭효과를 반영할 수 있는 하중분배모델을 많이 사용하고 있으며 본 연구에서도 하중분배모델을 사용하였다.

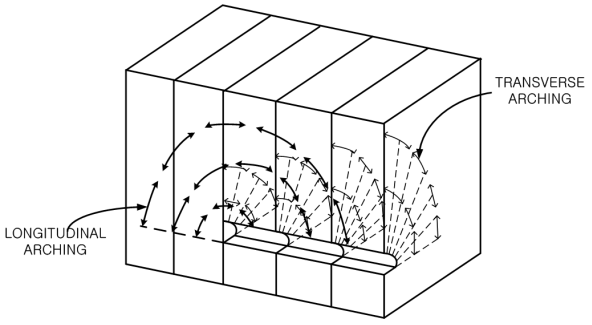

그림 1. 터널주위의 3차원 아칭효과
(Gnilsen, R., 1989)

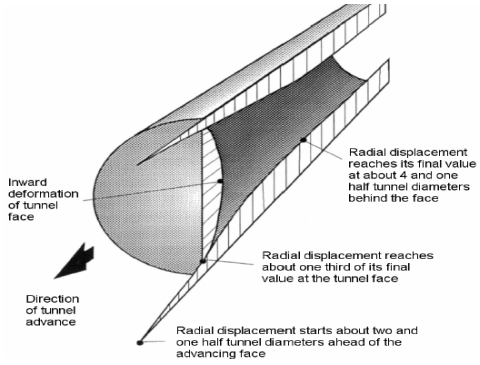

그림 2. 굴착되는 막장주위의 반경변위
(Hoek.1998)

정대열(1993)은 터널의 하중분배율에 영향을 미치는 요인으로 일일 굴착장, 굴착직경의 크기, 지반정수, 숏크리트의 두께 등이 주요한 요인이며 토피, 록볼트 개당 부담 면적, 굴착 형상, 측압계수 등은 하중분배율에 영향을 주지 못한다고 제시하였다.

하중분배율은 터널의 굴착에 따른 천단변위를 기준으로 계산을 하였으며, 터널의 변위 곡선은 굴착에 의한 응력재분배와 암반의 변형특성에 의하여 크게 영향을 받는다. 막장과의 거리가 가까울 때는 터널 굴착에 따른 응력재분배로 인한 탄소성 변위가 지배적이지만 막장과의 거리가 멀어짐에 따라 탄소성변위는 수렴되고 크리프에 의한 유동학적인 변위가 지배적 요소로 작용한다. 그러나 대부분 크리프변위는 탄소성변위와 비교해 무시할 수 있을 정도로 작다. 굴착이 계속적으로 진행될 때 해석하고자 하는 단면에서의 변위와 응력 상태는 막장과의 거리에 따라 변하게 된다. 굴착거리에 따라 해석지점의 변위를 최종변위에 대한 비로 표시하여 정규화한 변위곡선(normalized displacement curve)을 구할 수 있으며,

그 결과로부터 2차원 해석 시 사용할 수 있는 각 단계별 하중분담률을 구할 수 있다(Rove and Dack, 1983).

막장의 형태가 원형인 경우 일반적인 변위곡선은 그림 3과 같다. 굴착면에서 X_O만큼 떨어진 지점에서 시간 t_O만큼 경과한 이후 계측이 시작되므로 측정전에 C_O만큼의 변위가 발생된다. 따라서 U_A와 C_O에 대한 고려를 통해 전체변위의 크기를 결정하여야 한다. 응력조건이 평면 변형율 상태로 수렴할 때까지 발생하는 변위 U_A의 비율, U_A/U_T를 선행변위비(preceding displacement ration)라 하며 이는 지질조건, 암반과 지보재의 종류 및 수량 등에 의해 영향을 받는다. 선행변위비는 2차원 해석 시 굴착순간의 하중분담률 결정에 이용되기도 한다. 굴착 이후 계측이전 변위를 C_O라 하면 실제 측정된 변위 C_m은 식 (1)과 같다.

$$C_m = C(x, t) - C_O \qquad (1)$$

측정된 변위를 모델함수에 대해 회귀분석함으로써 함수의 변수들을 결정할 수 있다. U_A와 C_O에 대해 고려하여 전체변위의 크기를 결정하여야 하며, 회귀분석식에서 구한 최종변위 $C_T(=C_m+C_O)$에 굴착면 도달이전의 변위 U_A를 더하여 전체변위 U_T를 계산한다(Walter, 1990).

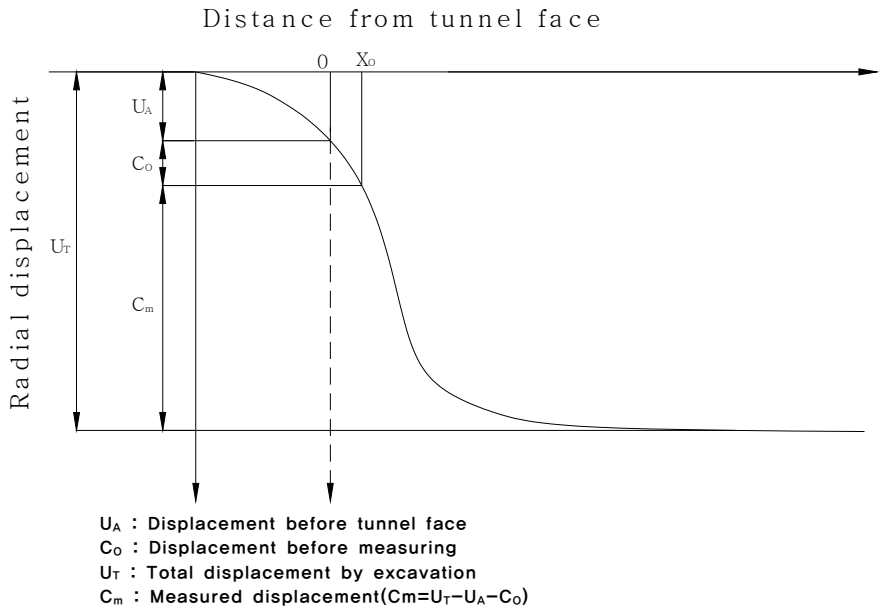

그림 3. 막장면으로부터 거리와 변위곡선(Walter, 1990)

3. 해석조건

본 연구에서 적용한 암반의 지반정수는 국내터널의 적용사례와 시험결과 그리고 일반적으로 도로터널 설계에서 적용하고 있는 결과들을 종합하여 판단한 후 적용하였다. 3차원 해석 시 적용한 암반 및 지보재의 정수값은 표 1, 표 2와 같으며, 이들 값을 기준으로 굴착장을 변화시켜 해석한 후 그 결과를 분석하였다. 터널 천단부에서 지표까지의 높이를 40m로 하여 수치해석을 실시하였으며, 이때 측압계수는 수직방향과 수평방향의 일반적인 영향범위인 1.0을 적용하였다. 터널의 직경은 11m로 전단면 굴착을 하였으며, 또한 본 연구의 핵심사항인 3차원 터널의 하중분배율과의 상관관계를 파악하기 위해 굴진장이 2m인 터널을 기준으로 굴착장을 2배씩 증가하였다. 터널의 해석 경계조건은 그림 4와 같다. 지반의 파괴조건은 mohr-coulomb모델을 사용하였으며, 지반은 solid요소, 숏크리트는 shell요소, 락볼트는 truss

요소를 사용하였다. 터널의 좌·우 영역은 터널 굴착에 따른 영향이 미치지 않는 일반적인 범위로 사용되는 터널 직경의 4배 이상을 적용하였고, 하부는 3배 이상을 적용하였다. 터널의 3차원 요소망은 그림 5와 같고, 해석 시 사용된 해석프로그램은 pentagon-3D이며, 하중분배율은 pentagon-3D에서 제공되는 기본기능을 이용하였다.

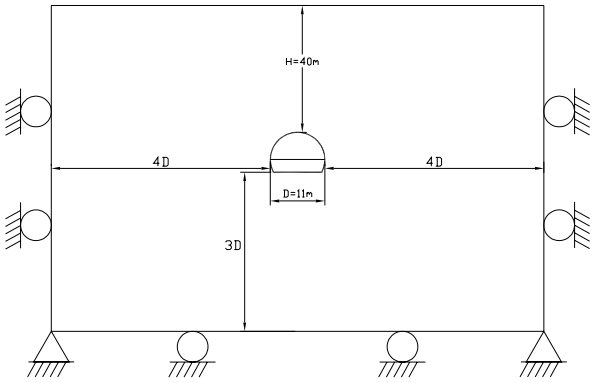

그림 4. 해석경계조건

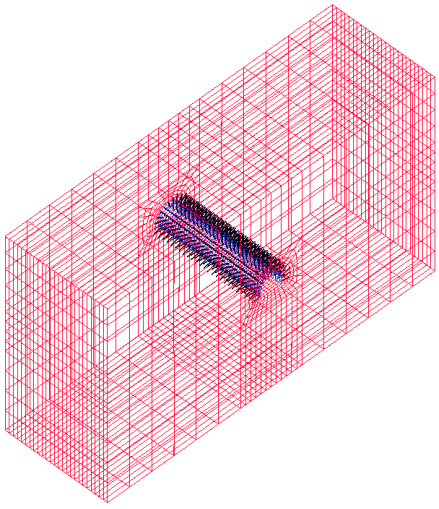

그림 5. 해석 요소망

표 1. 해석에 적용된 암반의 지반정수

구 분	점착력 (c, kPa)	마찰각 (ϕ)	탄성계수 (E, kPa)	프와송비 (ν)
적용값	400	40	4.69e5	0.33

표 2. 숏크리트와 록볼트 역학적 성질

숏크리트				
두께(cm)	면적(m^2)	탄성계수(kPa)		단면2차모멘트 (m^4)
		soft	hard	
12	0.12	5e6	1.5e7	1.3e-3

록볼트			
록볼트간격	면적(m^2)	탄성계수(kPa)	인장항복강도(N)
1.5×1.5	4.9e-4	2.1e8	1e5

4. 해석 결과

터널의 굴착에 따른 종방향 아칭효과를 확인하기 위하여 3차원 해석 시 하중분배율을 적용하였다. 우선 하중분배율의 적용하지 않은 경우 굴착장이 2m인 단면을 표준단면으로 하고, 굴착장을 2배씩 증가하면서 수치해석을 실시하였으며, 하중분배율을 적용하지 않은 결과를 이용하여 표준단면의 천단변위값에 의한 하중분배율을 나머지 2배씩 굴착장을 증가시킨 단면에 대해 적용하였다. 또한 표준단면의 경우 터널 굴착 시 발생된 변위값과 2배씩 굴착장을 증가한 단면의 터널 굴착 시 발생된 변위의 비에 따른 하중분배율 값을 각 단면에 터널의 굴착 시 하중분배율 값으로 적용하였다. 숏크리트 타설 단계에서는 남은 하중분배율 값의 반을 각각 적용한 경우의 2가지 방법을 이용하여 수치해석을 실시하였다.

4.1 하중분배율을 적용하지 않은 수치해석

터널의 하중분배율을 적용하지 않고 터널의 굴착장을 변화하여 종방향 아칭효과를 확인한 결과 숏크리트의 응력은 표 3, 터널의 천단변위 그래프는 그림 6과 같다. 표준단면의 경우 최대 천단변위는 15.66mm가 발생되었다. 굴착장을 2배 증가한 4m씩 굴착한 경우에는 16.63mm가 발생되었고, 8m 굴착은 17.51mm, 16m 굴착은 18.07mm, 32m 굴착에서는 18.46mm, 2차원 해석에서와 같이 종방향 아칭효과가 발생되지 않는 조건인 전구간을 한 번에 굴착한 경우에는 18.57mm가 발생하였다. 본 연구에서 제시한 지반정수 및 지보재 조건에서는 종방향 아칭효과에 의한 변위 차이는 2.91mm였으며, 굴착 시 종방향 아칭효과의 상실에 따른 응력해방으로 굴착 시 변위가 증가하였다. 또한 종방향 아칭효과를 무시할 수 있는 굴착장은 대략 초기 굴착장에 비해 30m의 차이가 있는 32m 굴착으로 판단된다. 전구간을 한 번에 굴착한 경우에는 초기 굴착에 따른 응력해방으로 천단변위는 초기 굴착단계에서 모두 발생되었다. 또한 터널의 종방향 아칭효과가 상실될수록 숏크리트의 응력은 감소되어 전단면 굴착에 따른 수치해석에서는 숏크리트 타설에 따른 숏크리트 응력이 발생되지 않아 보강효과를 무시할 수 있었다.

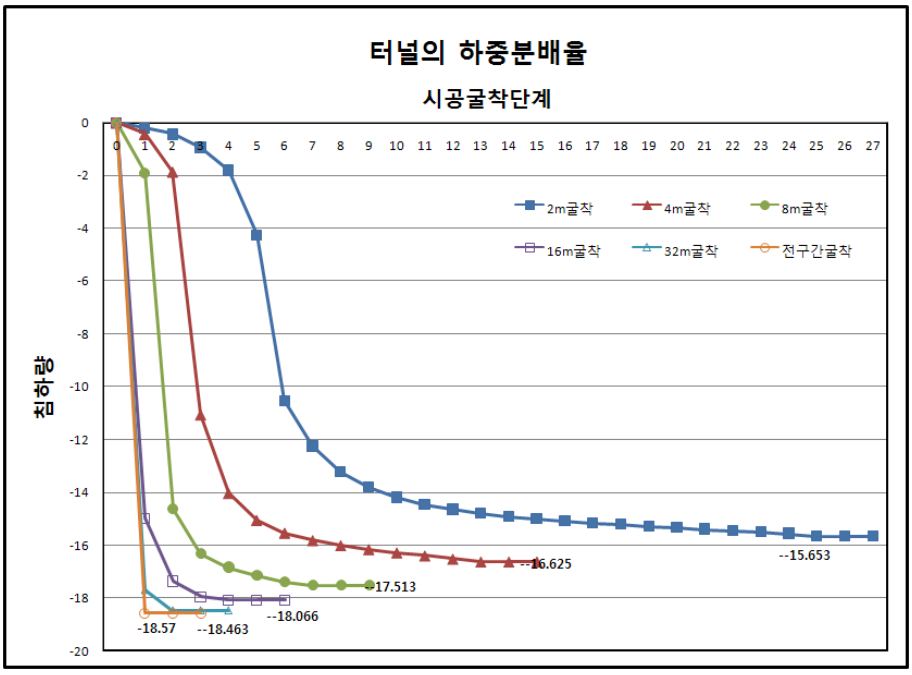

그림 6. 하중분배율을 적용하지 않은 경우 천단변위 그래프

표 3. 하중분배율을 적용하지 않은 경우 보강재 발생 숏크리트 응력

구 분		표준단면 (2m 굴착)	4m 굴착	8m 굴착	16m 굴착	32m 굴착	전단면굴착
숏크리트 응력 (kPa)	soft	163.2	41.4	20.4	42.1	21.6	0.0
	hard	177.3	143.1	128.1	91.6	21.6	0.0

4.2 하중분배율을 적용한 수치해석

터널의 3차원 수치해석 시 하중분배율을 적용한 천단변위 결과는 그림 7, 그림 8이고, 숏크리트 응력은 표 4, 표 5와 같다. 그림과 표는 각각 표준단면 굴착 시 발생된 천단변위 결과를 이용한 하중분배율 값과 표준단면 굴착 시 발생된 굴착 천단변위와 굴착장을 변화시킨 수치해석의 굴착 천단변위의 비를

이용하여 하중분배율을 적용하였다. 표 4와 그림 7은 표준단면 굴착 시 발생된 천단변위 값을 이용하여 구한 하중분배율을 적용한 결과로 그림 7과 같이 터널의 천단변위 값은 굴착장을 두 배 증가한 4m 굴착의 경우 15.42mm가 발생되었고, 8m 굴착은 15.83mm, 16m 굴착은 16.13mm, 32m 굴착에서는 16.39mm, 2차원 해석과 같은 조건인 전구간을 한 번에 굴착한 경우에는 16.46mm가 발생되었다. 표준단면 굴착 시 발생된 변위값을 이용한 하중분배율을 적용한 경우 표준단면과 변위차이는 4m 굴착 시 0.23mm, 8m 굴착은 0.18mm, 16m 굴착은 0.47mm, 32m 굴착은 0.74mm, 전단면 굴착에 따른 변위 차이는 0.81mm로 전단면 굴착 시에 최대변위의 차이가 발생되었다. 표 4와 같이 숏크리트의 응력은 soft 숏크리트 단계에서는 표준단면 굴착 시 발생된 숏크리트 응력에 비해 8%에서 20%정도를 보였고, hard 숏크리트 단계에서는 61%에서 98%정도를 보였다. 터널의 굴착장을 증가하여 수치해석을 한 경우 하중분배율을 적용하지 않았을 때 보다 숏크리트 응력은 증가하였고, 변위는 1mm 이내로 발생되었다.

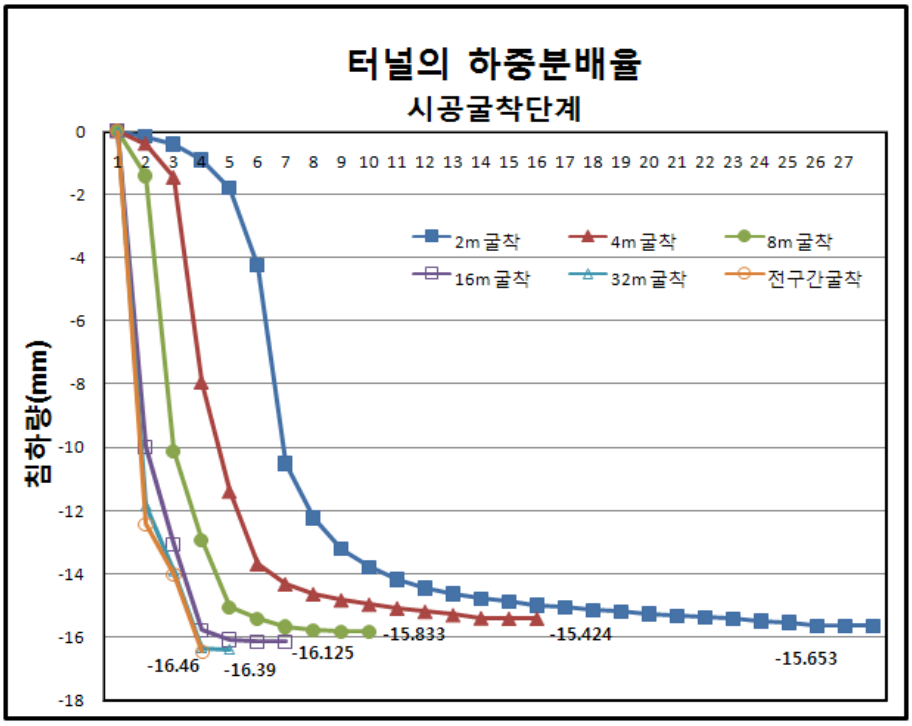

그림 7. 표준단면 굴착 시 계산된 하중분배율 적용 시 천단변위 그래프

표 4. 표준단면 굴착 시 계산된 하중분배율 적용 시 숏크리트 응력

구 분		표준단면 (2m 굴착)	4m 굴착	8m 굴착	16m 굴착	32m 굴착	전단면굴착
숏크리트 응력 (kPa)	soft	163.2	23.2	14.4	23.2	34.4	24.3
	hard	177.3	108.0	163.8	174.5	133	117.5

표 5와 그림 8은 표준단면 굴착 시 발생된 굴착변위와 굴착장을 변화시킨 단면의 굴착변위의 비를 이용하여 하중분배율을 적용한 결과로 그림 8과 같이 터널의 천단변위 값은 굴착장을 2배 증가한 4m씩 굴착한 경우에는 16.42mm가 발생되었고, 8m 굴착은 16.22mm, 16m 굴착은 16.82mm, 32m 굴착에서는 15.95m, 전구간을 한 번에 굴착한 경우는 16.02mm가 발생되었다. 표준단면 굴착 시 발생된 변위값과 굴착장을 증가한 단면의 천단변위 값의 변위 백분율을 이용한 하중분배율을 적용한 경우 표준단면 굴착과 변위차이는 4m 굴착 시 0.77mm, 8m 굴착은 0.57mm, 16m 굴착은 1.17mm, 32m 굴착은 0.3mm, 전단면 굴착에 따른 변위 차이는 0.36mm로 전단면 굴착 시에 최대변위차이가 발생되었다. 표

5와 같이 숏크리트의 응력은 soft 숏크리트 단계에서는 표준단면 굴착 시 발생된 숏크리트 응력에 비해 6%에서 44%정도의 값을 보였고, hard 숏크리트 단계에서는 64%에서 128%정도로 다소 큰 값을 보였다. 표준단면 굴착 시 산정된 하중분배율을 적용한 경우와 같이 하중분배율을 적용하지 않은 해석보다 숏크리트 응력은 증가하였으며, 변위차는 종방향 아칭효과를 무시할 수 있는 경우에는 0.3mm, 종방향 아칭효과가 나타나는 단면에서는 1.17mm 이내로 발생되었다. 표준단면과 굴착장을 증가한 단면의 굴착단계에서 발생된 변위 백분율은 식 (2)와 같다.

$$\text{변위백분율} = \frac{(\text{표준단면에서 발생된 천단변위})}{(\text{굴착장을 증가한 단면의 굴착단계에서의 천단변위})} \qquad (2)$$

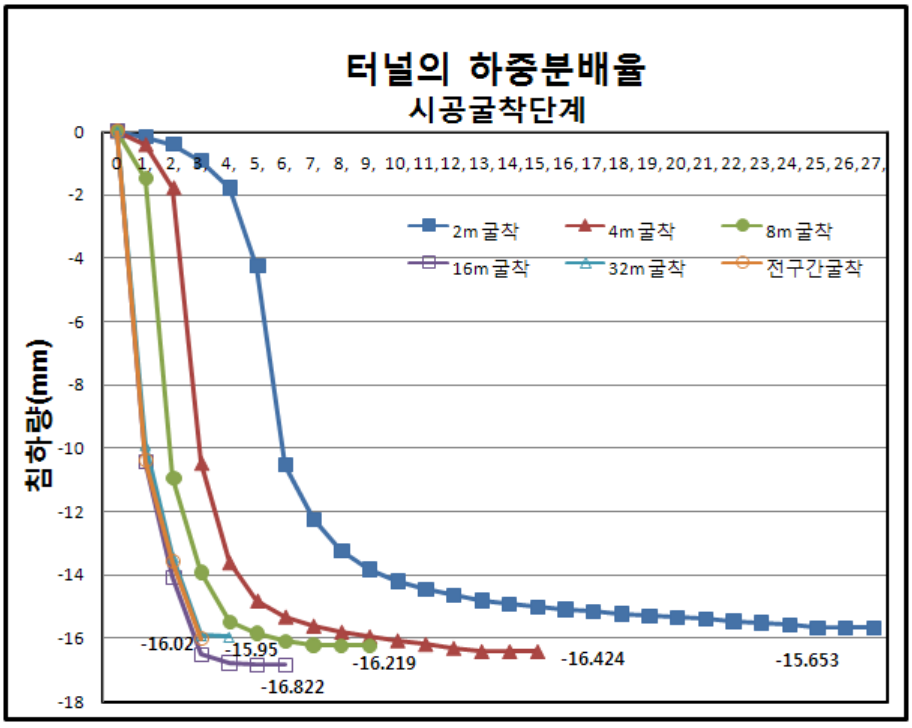

그림 8. 굴착 단계 시의 천단변위비에 따른 천단변위 그래프

표 5. 굴착 단계 시의 천단변위량 백분율에 따른 숏크리트 응력

구 분		표준단면 (2m 굴착)	4m 굴착	8m 굴착	16m 굴착	32m 굴착	전단면굴착
숏크리트 응력 (kPa)	soft	163.2	25.1	10.1	21.9	69.4	73.0
	hard	177.3	114.0	181.0	226.5	210.1	212.8

터널의 지반정수 및 지보량, 터널의 폭 등은 동일한 단면에 굴착장이 2m인 표준단면과 굴착장을 2배씩 증가한 단면의 3차원 수치해석 시 하중분배율의 적용에 대해 분석한 결과 하중분배율을 적용하지 않은 경우 터널의 굴착장이 증가할수록 종방향 아칭효과가 상실되면서 발생되는 응력해방으로 변위가 증가하여 최대 2.91mm가 발생되었다. 또한 굴착에 따른 응력의 해방으로 숏크리트의 응력은 점차 감소되어 전단면 굴착에서는 응력의 해방이 모두 발생된 후 숏크리트와 락볼트가 설치되어 응력이 발생되지 않았다. 이는 수치해석 시 응력의 해방이 모두 발생된 후 설치되는 보강재는 아무런 효과가 없다는 것을 의미하며, 터널 뿐 아니라 보강 비탈면 등의 안정성 분석에서도 비탈면 굴착 후 응력의 해방이 모두 발생된 후 보강재를 설치할 경우 보강재의 응력이 미비하거나 발생되지 않을 수가 있기 때문에 보강재

의 설치시기를 고려한 하중분배율을 적용해야 정확한 보강재의 응력을 파악될 것으로 판단된다. 표준단면에서 발생된 천단변위를 이용한 하중분배율 값을 굴착장이 증가된 단면에 적용한 경우 하중분배율을 적용하지 않은 단면보다 변위의 값이 1mm 이내로 수렴되었고, 숏크리트의 응력은 하중분배율을 적용하지 않은 경우 전단면에서 발생되지 않았던 응력이 61%에서 98%까지 응력이 발생되었다. 이는 굴착 단계에서 응력해방을 줄여 발생된 것으로 판단된다. 표준단면의 천단변위 값과 굴착장을 증가시킨 단면의 천단변위의 굴착 시 발생된 변위값의 변위 백분율을 이용하여 하중분배율을 적용한 경우 하중분배율을 적용하지 않은 경우보다 종방향 아칭효과를 무시할 수 있는 단면에서는 0.3mm, 종방향 아칭효과가 나타나는 단면에서는 1.17mm의 변위차가 발생하였다. 숏크리트 응력은 하중분배율을 적용하지 않은 경우보다 64%에서 117%로 다소 크게 발생되었다. 이상의 수치해석으로 터널의 3차원 해석 시 해석시간을 줄이기 위한 하중분배율을 적용할 경우 표준단면에 의해 산정된 하중분배율의 적용보다 굴착 단계에서 발생된 변위값의 백분율을 이용한 해석이 정확한 결과를 보였다.

5. 결론

본 연구는 터널의 3차원 안정성 분석 시 불필요한 해석단계를 간소화하여 3차원 수치해석의 해석시간을 줄일 수 있는 3차원 하중분배율의 적용에 대한 연구를 수행한 결과는 다음과 같다.

1. 하중분배율을 적용하지 않은 경우 종방향 아칭효과가 상실되는 굴착장은 30m 이상이며, 표준단면 굴착과 천단변위 차이는 최대 2.91mm, 숏크리트 응력은 점차 감소되어 전단면 굴착에서는 굴착에 따른 응력해방이 모두 발생된 후 보강재가 설치되어 숏크리트의 응력이 발생되지 않았다.
2. 표준단면 굴착 시 발생된 천단변위 값을 통해 하중분배율을 적용하여 종방향 아칭효과를 확인한 경우 표준단면 굴착과 천단변위 차이는 최대 0.81mm이며, 숏크리트 응력은 표준단면에 비해 soft 숏크리트 단계에서는 8%에서 20% 정도의 값을 보였으며, hard 숏크리트 단계 설치 시에는 61%에서 98%정도의 값을 보였다.
3. 표준단면과 굴착장을 변화시킨 단면의 굴착단계 시 변위비를 이용한 하중분배율을 적용한 경우 표준단면 굴착과 천단변위 차이는 종방향 아칭효과가 발생되는 단면에서는 최대 1.17mm, 종방향 아칭효과가 발생되지 않는 단면에서는 0.3mm 이내로 발생되었으며, 숏크리트 응력은 표준단면에 비해 soft 숏크리트 단계에서는 6%에서 44%, hard 숏크리트 단계 설치 시에는 64%에서 117% 정도 발생되었다.
4. 터널의 3차원 해석 시 하중분배율을 적용할 경우 표준단면 굴착 시 발생된 천단변위에 의한 하중분배율을 적용한 경우보다 굴착단계에서의 천단변위 백분율을 이용한 경우 종방향 아칭효과가 발생되지 않는 단면이 표준단면 굴착 시 발생된 변위값과 유사하였으며, 종방향 아칭효과가 발생되는 단면에서는 표준단면에서 계산된 하중분배율을 적용하는 것이 표준단면에서 발생된 변위값과 유사하였다.
5. 3차원 해석에 의한 하중분배율 적용 시 지반정수 및 지반보강방법, 터널의 폭 등의 터널의 안정성 분석 시 필요한 변수의 민감도 분석을 통한 추가적인 연구 및 비탈면, 지반굴착에서의 하중분배율 적용의 연구가 필요한 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 정대열, (1993), “터널의 막장 주위의 3차원적 영향을 고려하는 2차원 해석 모델의 하중분배율에 관한 연구”, 박사학위논문, 서울대학교.
2. Gnilsen., R., (1989), "Numerical Methods", Underground Structures Design and Instrumentation, Elsevier.
3. Hoek. E., (1998), “Tunnel Support in Weak Rock”, Proc. Regional Symposium, on Sedimentary Rock Engineering, Taipei, Nov 20-22, pp.1~12.
4. Rove, R.K., Dack, G.T., (1983), "A Theoretical Examination of the Settlements Induced by Tunneling Four Case Histories", Canadian Geotechnical Journal, 20, pp.299~314.
5. Sinha, R.S., (1991), "Underground Structures-Design and Construction", Elsevier, USA.
6. Walter Wittke, (1990), "Rock Mechanics Theory and Applications with Case Histories", Spring-Verlag, pp.444~471.