

굴착방법과 초기지압 조건을 고려한 하중분배율의 선정 연구

박연준^{1)*}, 유일형²⁾

A Study on the Estimation of Load Distribution Factors Considering Excavation Methods and Initial Stress Conditions

Yeon-jun Park, Il-hyung Ryu

Abstract In this study, 3-D analyses were conducted while taking every construction stage into account. Then 2-D analyses were conducted which yield the same results with the 3-D results. The crown settlement normalized by the ultimate value was compared during the process to overcome the discrepancy caused by different dimensions. When a bench or a core is left uncut to give extra support to the face and eventually the whole excavation boundary, this extra supporting effect also has to be included in the analysis. In this study, this effect is also implemented in terms of the load distribution factor. When the length of the bench is very short compared to the diameter of the tunnel in such cases as in short bench cut or in mini-bench cut, the supporting effect of the face does not disappear even after the bench is completely excavated and supported since the face is still too close to the point of interest. The 4th load distribution factor was defined to stand for the advance of the face after the completion of the excavation cycle. The 4th load distribution factor turned out to be very useful in determining the load distribution factors when a tunnel is excavated by bench cut with various bench lengths under different initial conditions.

Key words Load distribution factors, 3-D analysis, Bench length, Initial stress condition

초 록 본 연구에서는 시공단계를 정확하게 고려하여 3차원 해석을 수행하고, 이와 동일한 결과를 나타내는 2차원 해석 결과를 얻고자 천단변위를 기준으로 하여 하중분배율을 결정하였다. 2차원 해석 결과와 3차원 해석 결과에서 천단변위의 총량에는 차이가 있어, 이를 극복하고자 각 단계에서의 천단변위 값을 총 변위량으로 나눈 '천단변위비'를 비교 대상으로 정하였다. 또한 숏벤치 공법이나 미니벤치 공법의 경우에서처럼 상하 반단면 분할 굴착에서 벤치의 길이가 짧은 경우에는 하부 반단면의 굴착이 완료된 후에도 굴진면의 지지효과가 사라지지 않는 상황이 발생한다. 이러한 상황을 해석에 반영하고자 4번째 하중분배계수를 도입하여 굴진면 전진 효과를 구현하도록 하였다. 그 결과 전단면 굴착, 상하 반단면 분할굴착, 벤치 길이의 변화 및 초기 응력 상태 등을 고려한 다양한 경우에 대하여 합리적으로 하중분배율을 결정하는 방법을 제시하였다.

핵심어 하중분배율, 3차원 해석, 벤치길이, 초기지압조건

1. 서 론

NATM 공법이 국내에 도입된 이후로 기술적인 면에서 비약적인 발전을 거듭하여 과거 도심지의 지상공간

을 대체하는 대신도 터널이나 지하 도시 등의 대규모 지하공간의 건설에 대한 상상이 현실화 되는 시점에 와 있다. 이를 위해선 안전하고 경제적인 지하구조물의 시공뿐만 아니라 터널설계의 타당성을 검증하는 것이 대단히 중요하다. 하지만 현재로서는 수치해석기법의 급격한 발전 및 보급에도 불구하고 현장조건 중 일부 요소들만을 반영한 해석으로 터널 굴착으로 인한 터널의 안정 및 주변 지반의 거동특성을 정확히 평가하기에는 어려움이 많은 실정이다.

터널 굴착을 함에 따라 초기 지반응력, 종방향과 횡방

¹⁾ 수원대학교 공과대학 토목공학과 교수

²⁾ 제이디에코(주) 부사장

* 교신저자 : yjpark@suwon.ac.kr

접수일 : 2011년 6월 13일

심사 완료일 : 2011년 6월 23일

게재 확정일 : 2011년 6월 27일

향 아치효과에 의하여 변형력이 발생하기 때문에 이러한 실제의 시공단계를 고려하기 위해서는 3차원 해석이 필요하다. 그러나 3차원 해석 시에 투입되는 시간적, 경제적 노고는 3차원 해석의 이점보다 더 큰 손실로 작용할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 시공 단계를 고려하여 3차원 효과를 적절히 모사(simulation) 할 수 있는 2차원 수치해석 기법이 필요하게 된 것이다. 이러한 2차원 해석모형을 적용하기 위하여 하중분배을 개념이 도입되었다.

본 연구에서는 각 지보패턴별 시공단계와 벤치길이 및 축압계수(K_0) 변화를 고려한 3차원 해석을 통해 2차원 해석 시 전단면 굴착 및 상하 반단면 분할굴착 각각의 경우에 대해서 정량적이며 합리적으로 하중분배을 산정할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다. 이를 위해 3차원 탄소성 해석 결과 발생된 변위비와 일치할 때까지 단계별 하중분배계수 값을 계속 변화시켜가며 입력하여 2차원 탄소성 해석을 반복 수행하였다. 3차원 및 2차원 해석결과와 굴착 단계, 지보 설치 단계별 전단 변위비 경향을 비교함으로써 하중분배을 산정방법의 적정성을 판단하였다. 특히 상하 반단면 굴착에서 하중분배계수의 4번째 인자 δ 를 도입하여 2차원 해석 시 막장부의 초기변위를 억제하는 벤치설치 효과를 확인하였다.

2. 하중분배을 산정을 위한 수치해석 방법

2.1 암반분류 및 적용물성의 선정

본 연구에서 적용한 암반분류는 박연준(2002)이 제안한 암반 분류 1안과 2안 중 2안의 2등급과 3등급을 묶고, 대신 최하등급의 불량한 암반을 세분화한 것으로 표 1에 수록하였다. 또한 현재 Q 값과 RMR의 관계에 흔히 이용되는 Bieniawski의 관계식은 식 (1)과 같다.

$$RMR \approx 9\ln Q + 44 \quad (1)$$

그러나 식 (1)은, Q 값이 작은 경우에는 음수가 나오는 단점이 있다. Barton은 이러한 단점을 개선하여 식

표 1. Q 값에 따른 암반분류

| 암반등급 | Q 값의 범위 | RMR 값의 범위 |
|------|----------------|---------------|
| 1 | 40 < Q | 74 < RMR |
| 2 | 4 < Q ≤ 40 | 59 < RMR ≤ 74 |
| 3 | 0.1 < Q ≤ 4 | 35 < RMR ≤ 59 |
| 4 | 0.01 < Q ≤ 0.1 | 20 < RMR ≤ 35 |
| 5 | Q ≤ 0.01 | RMR ≤ 20 |

(2)를 제안 한 바 있다.

$$RMR \approx 15 \log Q + 50 \quad (2)$$

식 (2)를 사용할 경우 Q 값이 작은 경우에도 RMR 값이 음의 값으로 환산되지 않게 되지만, Q 값이 작은 경우 RMR 값이 다소 크게 환산되는 단점이 있다. 그러나 국내 암반에 대한 이상돈 등(2002)의 연구에 의해서도 동일한 식이 유도된 바 있어 국내 암반에 대한 적용성이 우수한 것으로 판단되어 본 연구에서는 Barton(1995)이 제안한 식 (2)를 적용하였다.

2.2 암반의 변형성

과거에는 암반의 변형성 산정 시 RMR 및 Q 값과 관련하여 다소 오차가 큰 근사식이 사용되었으나 최근에 들어서는 좀 더 잘 맞도록 변형되고 있다. 하지만 RMR과 Q 값으로부터 변형계수를 어렵잡는 것은 어려운 작업이다. 초기의 시도는 Barton(1995)은 이러한 연구결과를 바탕으로 실측 자료와 비교하여 식 (3)과 같은 추정식을 발표하였다.

$$\bar{M} \approx 10Q^{1/3} \quad (3)$$

식 (3)은 암석의 일축압축강도 변화에 따른 변형성의 변화를 고려하지 못하므로, Barton은 이를 무결암의 일축압축강도로 일반화하여 식 (4)와 같이 개선하였다.

$$M \approx 10Q_c^{1/3} \text{ (GPa)} \quad (4)$$

여기서 $Q_c = Q \frac{f_c}{100}$, (f_c 의 단위는 MPa)이다.

Barton(1995)이 제안한 식 (4)는 스칸디나비아의 지질특성상 풍화대가 없는 지반에 대한 값이다. 그러나 국내의 고속도로 터널 설계의 적용사례(한국도로공사, 2008, 2009, 2010)를 살펴보면 식 (4)에 의한 탄성계수는 다소 큰 값을 나타내며, 스칸디나비아에서 사용하는 슛크리트와 국내 슛크리트와의 강도 및 탄성계수의 차이 등을 종합적으로 고려하면 식 (4)의 50% 값이 적절한 것으로 판단되었다.

2.3 지반 물성

본 연구에서 적용한 지반 물성은 암반분류에 따른 물성과 국내의 터널 설계 적용사례를 종합적으로 고려하여 산정하였으며, 암반등급별 지반 물성은 표 2와 같다.

표 2. 해석에 사용된 암반등급별 물성

| 암반 등급 | 변형계수 (GPa) | 점착력 (kPa) | 내부 마찰각 (°) | 포아송비 | 단위중량 (kN/m ³) |
|-------|------------|-----------|------------|------|---------------------------|
| 1 | 17 | 3,000 | 45 | 0.20 | 27.0 |
| 2 | 14 | 2,000 | 42 | 0.22 | 26.0 |
| 3 | 6.5 | 600 | 37 | 0.25 | 25.0 |
| 4 | 3.0 | 200 | 34 | 0.28 | 23.0 |
| 5 | 1.4 | 50 | 32 | 0.30 | 21.0 |

표 3. 숏크리트 및 록볼트 물성

| 구 분 | | 탄성계수(GPa) | 포아송비 |
|------|-----|-----------|------|
| 숏크리트 | 연 성 | 5 | 0.2 |
| | 경 성 | 10 | 0.2 |
| 록볼트 | | 210 | 0.3 |

2.4 지보재 물성

표 3에서의 숏크리트는 해석 시 탄성체로 가정되므로 강도는 입력하지 않으며, 탄성계수는 양생기간을 고려하여 연성 숏크리트 및 경성 숏크리트로 구분하였다. 또한 록볼트는 중방향 설치간격을 고려하여 2차원 해석을 수행하였다.

2.5 해석영역 및 경계조건

본 연구에서 적용된 지반의 해석영역은 해석경계로 인한 응력 및 변위 오차 발생을 최소화하기 위해 그림 1에서와 같이 터널 하부와 측면을 터널 직경(D)의 5배인 5D(70 m)로 충분히 확보하였다. 또한 토피고는 3등

급 이상의 암반은 대체로 토피고가 충분하거나 다소 심부에 위치하는 것을 감안하여 터널 심도의 영향을 받지 않는 5D(70 m)로 설정하였으며, 4등급 이하의 암반은 상부 토피고가 5D 높이가 이상일 경우 터널 안정성 확보가 어려운 것을 고려해 터널 안정성이 확보되고 터널 심도의 영향이 최소화 되는 3D(42 m)로 설정하여 3차원 및 2차원 해석을 수행하였다.

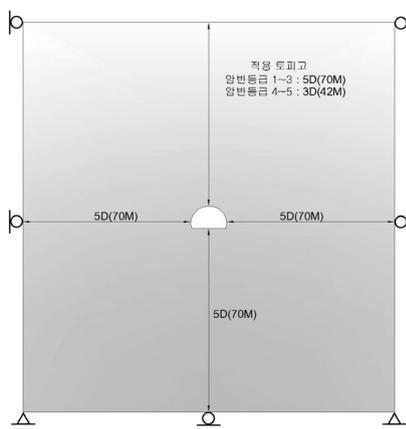
그림 2의 (a)에서 중방향 해석영역은 전체 11D(154 m)로 하였으며, 이 중 굴착영역은 8D(112 m), 비굴착영역은 3D(42 m)로 적용하여 막장의 영향을 고려할 수 있도록 하였다. 해석 시 변위거동 관측지점은 굴착 시 점으로부터 48 m 떨어진 지점으로 정하였다. 또한, 그림 2의 (b)에 도시한 바와 같이 유한요소의 크기를 지보 패턴별 1 막장 굴진장의 1/3로 세분화하여 모델링함으로써 해석의 정확성을 높이고자 하였다.

본 연구에서의 경계조건은 좌, 우의 경계에서 상·하로 이동되며, 하부의 경계부에서는 좌·우로만 이동할 수 있도록 하고, 중방향의 시작단면과 끝단면에서는 앞·뒤로의 이동을 방지하도록 각 요소마다 roller를 설치하였다. 또한 하부의 좌·우측 끝 절점은 고정되며, 나머지 절점에 대해서는 X, Y, Z방향으로 이동이 가능하고 회전에 대해 구속을 갖는 경계조건을 설정하였다.

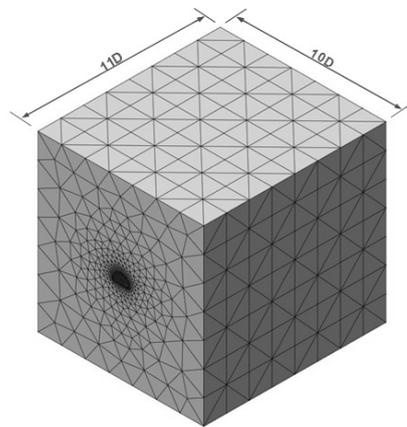
2.6 암반등급별 지보조건

본 연구에서는 국내에서 일반적으로 설계되는 도로터널 단면(터널 직경 D=14 m) 및 5개의 지보패턴을 적용하였고, 그 중 대표적인 단면을 그림 3에 도시 하였다.

표 5에 나타낸 바와 같이 국내의 도로터널에서 일반적으로 적용하는 대표적인 지보패턴을 적용하여 굴착



(a) 횡단면 모델링



(b) 3차원 유한요소망

그림 1. 횡단면 수치해석 모델링



그림 2. 종방향 수치해석 모델링

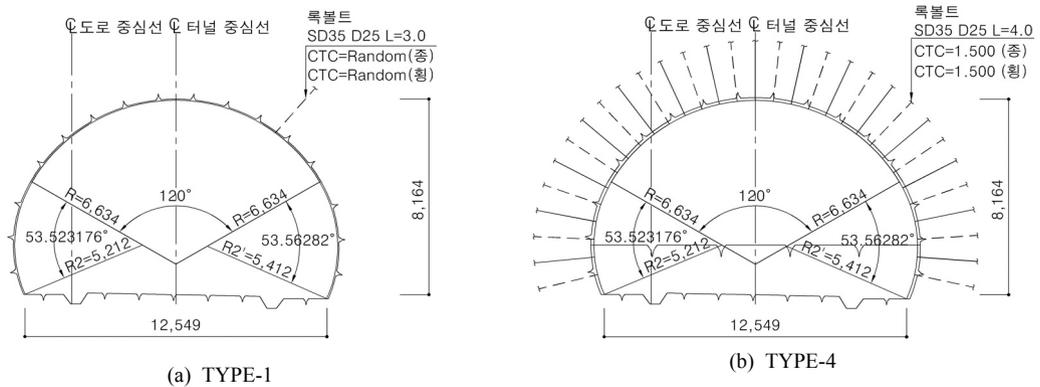


그림 3. 해석에 적용된 터널 표준단면도(TYPE-1, TYPE-4)

표 5. 해석에 사용된 암반등급별 지보패턴

| 암반등급 | 지보패턴 | 굴착방법 | 굴진장 (m) | 숏크리트 두께 (mm) | 록볼트 | | |
|------|--------|---------|---------|--------------|--------|--------|--------|
| | | | | | 길이 (m) | 간격 (m) | |
| | | | | | | 종방향 | 횡방향 |
| 1 | TYPE-1 | 전단면굴착 | 4.0 | 50 (일반) | 3.0 | random | random |
| 2 | TYPE-2 | 전단면굴착 | 4.0 | 60 (강섬유) | 3.0 | 4.0 | 2.0 |
| 3 | TYPE-3 | 전단면굴착 | 2.5 | 90 (강섬유) | 4.0 | 2.5 | 1.5 |
| 4 | TYPE-4 | 상하반분할굴착 | 1.5/3.0 | 120 (강섬유) | 4.0 | 1.5 | 1.5 |
| 5 | TYPE-5 | 상하반분할굴착 | 1.2/1.2 | 160 (강섬유) | 4.0 | 1.2 | 1.5 |

공법별 하중분배율 결정을 위한 3차원 및 2차원 해석을 수행하였다.

2.7 하중분배율 적용방법

2차원 해석에서 하중분배율은 굴착방법에 따른 시공 순서를 고려하여 적용하였다. 첫째 전단면 굴착의 경우는 굴착, 연성 숏크리트 및 록볼트 설치, 경성 숏크리트의 3단계로 구성하였고, 둘째 종방향 지지력을 향상시키기 위해 굴진면에 벤치를 남기는 상하 반단면 분할굴

착의 경우에는 상반, 하반 각각에 대하여 굴착, 연성 숏크리트 및 록볼트 설치, 경성 숏크리트 단계와 굴진면 전진단계를 마지막으로 하여 총 7단계로 구성하였다.

2.7.1 전단면 굴착 단면

비교적 간단한 시공 단계를 갖는 전단면 굴착의 시공 단계를 고려한 2차원 해석 단계별 하중분배율의 적용 순서를 표 6에 수록하였다.

2.7.2 상하 반단면 분할굴착 단면

숫벤치 공법이나 미니벤치 공법의 복잡한 시공단계를 갖는 상하 반단면 분할굴착에 대한 2차원 해석 단계별 하중분배율의 적용순서를 표 7에 수록하였다. 특히 벤치의 짧아짐으로 인해 하부 반단면의 굴착이 완료된 후에도 굴진면의 지지효과가 사라지지 않는 상황을 해석에 반영하고자 도입한 4번째 하중분배계수 δ 를 굴진면 전진단계에서 적용하였다.

3. 수치해석 결과

3.1 전단면 굴착에 대한 해석 결과

3차원 수치해석의 경우 전체 11D 중 8D(112 m)까지 굴착하여 굴진면 전방의 비굴착부에 의한 종방향 아치 영향을 고려하였으며, 천단변위 측정 기준 위치는 48 m 지점이다. 측압계수의 영향을 분석하기 위하여 측압계수를 0.5, 1.0, 2.0으로 각각 달리하여 3차원 및 2차원 수치해석을 수행하였다. 2차원 해석 시 3차원 변위비를 2차원 해석의 하중분배율로서 적용하였다. 따라서 3차원 해석의 변위비와 2차원 해석의 하중분배율은 상관관계가 상당히 높다는 것을 알 수 있다.

표 8에서 3차원 해석 결과는 측압계수가 0.5~2.0으로 증가함에 따라 변위량은 감소하며, 변위비는 측압계수의

표 6. 전단면 굴착 단면에 대한 하중분배율 적용 순서

| 순서 | 해석 단계 | 하중분배율(%) |
|----|------------------|----------|
| 1 | ① 굴착 | α |
| 2 | ② 연성S/C + 록볼트 설치 | β |
| 3 | ③ 경성S/C | γ |

영향이 적은 것으로 판단된다. 표 9에서와 같이 2차원 해석의 결과는 굴착단계에서 72.97~51.85%, 연성 S/C 및 R/B 단계에서 13.08~13.23%, 경성 S/C 단계에서 14.61~34.92%의 변화 경향을 보인다. 이는 암반등급이 양호할수록 굴착 직후 변위비가 큰 비율을 차지하여 터널 주변 응력을 지보재 보다는 암반자체가 더 부담하게 되므로 굴착단계 하중분배율이 커지는 것으로 판단된다. 그림 4는 전단면 굴착에 대한 3차원 및 2차원 해석의 변위비를 누적변위비로 표현하여 나타낸 것이다. 3차원의 변위비와 2차원의 변위비가 유사함을 알 수 있다.

3.2 상하 반단면 분할굴착에 대한 해석 결과

4, 5등급 암반의 경우 상하 반단면 분할굴착을 수행하였다. 3차원 수치해석의 경우 비굴착 영역(3D)을 제외한 11D중 8D(112 m)까지 굴착하였으며, 천단변위 측정 기준 위치는 48 m 지점이다. 측압계수의 영향을 분석하기 위하여 측압계수를 0.5, 1.0, 2.0으로 각각 달리하여 2차원 및 3차원 수치해석을 수행하였으며, 벤치길이에 따른

표 7. 상하 반단면 분할굴착 단면에 대한 하중분배율 적용 순서

| 순서 | 해석 단계 | | 하중분배율(%) |
|----|--------|-----------------|------------|
| 1 | 상반 | 굴착 | α_1 |
| 2 | | 연성 S/C + 록볼트 설치 | β_1 |
| 3 | | 경성 S/C | γ_1 |
| 4 | 하반 | 굴착 | α_2 |
| 5 | | 연성 S/C + 록볼트 설치 | β_2 |
| 6 | | 경성 S/C | γ_2 |
| 7 | 굴진면 전진 | | δ |

표 8. TYPE-1, 2, 3에 대한 3차원 해석 변위 및 변위비 결과

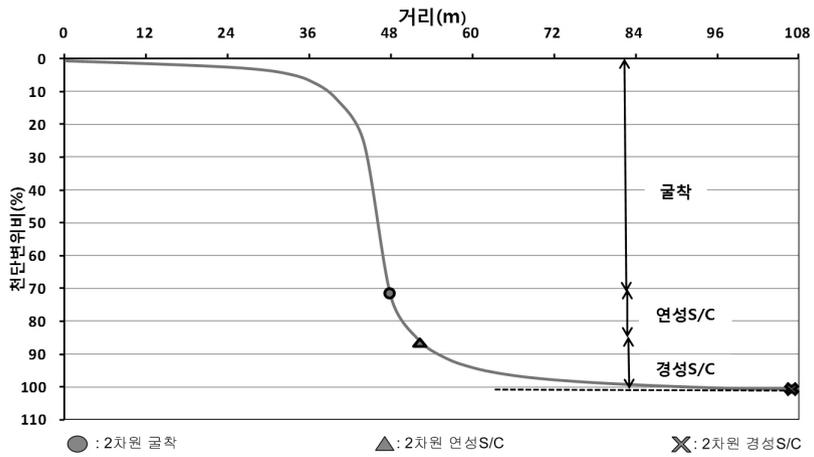
| TYPE | 측압계수 (Ko) | 굴착 | | 연성S/C+R/B | | 경성S/C | | 총 변위량 (mm) |
|------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|------------|
| | | 변위 (mm) | 변위비 (%) | 변위 (mm) | 변위비 (%) | 변위 (mm) | 변위비 (%) | |
| 1 | 0.5 | 0.81 | 72.97 | 0.14 | 12.61 | 0.16 | 14.42 | 1.11 |
| | 1.0 | 0.69 | 71.88 | 0.13 | 13.54 | 0.14 | 14.58 | 0.96 |
| | 2.0 | 0.46 | 71.88 | 0.09 | 14.06 | 0.09 | 14.06 | 0.64 |
| 2 | 0.5 | 1.30 | 73.03 | 0.23 | 12.92 | 0.25 | 14.05 | 1.78 |
| | 1.0 | 1.12 | 73.20 | 0.20 | 13.07 | 0.21 | 13.73 | 1.53 |
| | 2.0 | 0.77 | 72.64 | 0.15 | 14.15 | 0.14 | 13.21 | 1.06 |
| 3 | 0.5 | 1.68 | 65.37 | 0.34 | 13.23 | 0.55 | 21.40 | 2.57 |
| | 1.0 | 1.46 | 65.77 | 0.30 | 13.51 | 0.46 | 20.72 | 2.22 |
| | 2.0 | 1.00 | 52.91 | 0.24 | 12.70 | 0.65 | 34.39 | 1.89 |

표 9. TYPE-1, 2, 3에 대한 2차원 해석 변위 및 변위비 결과

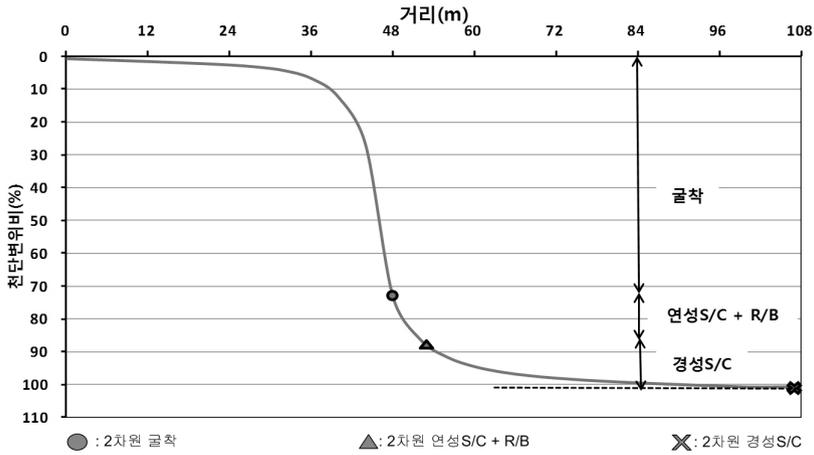
| TYPE | 측압계수 (Ko) | 굴착 | | 연성S/C+R/B | | 경성S/C | | 총변위량 (mm) | 적용하중분배율(%) | | |
|------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|-----------|------------|---------|----------|
| | | 변위 (mm) | 변위비 (%) | 변위 (mm) | 변위비 (%) | 변위 (mm) | 변위비 (%) | | α | β | γ |
| 1 | 0.5 | 0.94 | 72.31 | 0.17 | 13.08 | 0.19 | 14.61 | 1.30 | 73 | 13 | 14 |
| | 1.0 | 0.78 | 71.56 | 0.15 | 13.76 | 0.16 | 14.68 | 1.09 | 72 | 13 | 15 |
| | 2.0 | 0.48 | 70.59 | 0.10 | 14.71 | 0.10 | 14.71 | 0.68 | 72 | 14 | 14 |
| 2 | 0.5 | 1.53 | 72.51 | 0.28 | 13.27 | 0.30 | 14.22 | 2.11 | 73 | 13 | 14 |
| | 1.0 | 1.31 | 72.38 | 0.25 | 13.81 | 0.25 | 13.81 | 1.81 | 73 | 13 | 14 |
| | 2.0 | 0.86 | 71.67 | 0.18 | 15.00 | 0.16 | 13.33 | 1.20 | 73 | 14 | 13 |
| 3 | 0.5 | 2.20 | 64.14 | 0.46 | 13.41 | 0.77 | 22.45 | 3.43 | 65 | 14 | 21 |
| | 1.0 | 1.92 | 65.09 | 0.41 | 13.90 | 0.62 | 21.01 | 2.95 | 66 | 14 | 20 |
| | 2.0 | 0.98 | 51.85 | 0.25 | 13.23 | 0.66 | 34.92 | 1.89 | 53 | 13 | 34 |

표 10. TYPE-4에 대한 3차원 해석 변위 및 변위비 결과

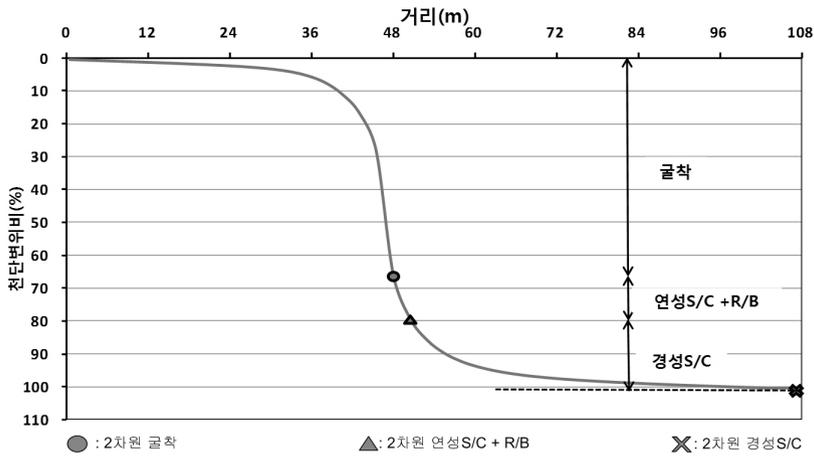
| 구분 | | 굴착 (변위mm/ 변위비%) | 연성S/C+R/B (변위mm/ 변위비%) | 경성S/C (변위mm/ 변위비%) | 굴진면전진 (변위mm/ 변위비%) | 총변위량 (mm) | |
|--------|--------|-----------------|------------------------|--------------------|--------------------|------------|------|
| Ko=0.5 | L=0.5D | 상반 | 1.72/52.76 | 0.42/12.88 | 0.44/13.50 | 0.56/17.18 | 3.26 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.12/3.68 | | |
| | L=1.0D | 상반 | 1.72/52.76 | 0.42/12.88 | 0.79/24.23 | 0.29/8.90 | 3.26 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.04/1.23 | | |
| | L=2.0D | 상반 | 1.73/52.58 | 0.42/12.77 | 1.00/30.40 | 0.12/3.64 | 3.29 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.02/0.61 | | |
| L=4.0D | 상반 | 1.73/53.07 | 0.42/12.88 | 1.09/33.44 | 0/0 | 3.26 | |
| | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.02/0.61 | | | |
| Ko=1.0 | L=0.5D | 상반 | 1.51/52.98 | 0.36/12.63 | 0.40/14.04 | 0.48/16.84 | 2.85 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.10/3.51 | | |
| | L=1.0D | 상반 | 1.52/53.41 | 0.36/12.41 | 0.73/25.17 | 0.27/9.31 | 2.90 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.02/0.69 | | |
| | L=2.0D | 상반 | 1.52/52.78 | 0.36/12.50 | 0.90/31.25 | 0.10/3.47 | 2.88 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0/0 | | |
| L=4.0D | 상반 | 1.52/52.96 | 0.35/12.20 | 1.00/34.84 | 0/0 | 2.87 | |
| | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0/0 | | | |
| Ko=2.0 | L=0.5D | 상반 | 0.99/25.06 | 0.85/21.52 | 1.30/32.91 | 0.65/16.46 | 3.95 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.16/4.05 | | |
| | L=1.0D | 상반 | 0.95/23.40 | 0.86/21.18 | 1.99/49.01 | 0.19/4.68 | 4.06 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.07/1.72 | | |
| | L=2.0D | 상반 | 0.95/23.99 | 0.86/21.72 | 2.15/54.29 | 0/0 | 3.96 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0/0 | | |
| L=4.0D | 상반 | 0.95/23.81 | 0.86/21.55 | 2.18/54.64 | 0/0 | 3.99 | |
| | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0/0 | | | |



(a) 1등급 암반



(b) 2등급 암반



(c) 3등급 암반

그림 4. 전단면 굴착에 대한 3차원과 2차원 해석 결과

표 11. TYPE-4에 대한 2차원 해석 변위 및 변위비 결과

| 구분 | 굴착 (변위mm/ 변위비%) | 연성S/C+R/B (변위mm/ 변위비%) | 경성S/C (변위mm/ 변위비%) | 굴진면전진 (변위mm/ 변위비%) | 총변위량 (mm) | 적용하중분배율(%) | | | | | |
|--------|-----------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|----------------|---------------|----------------|----------|----|----|
| | | | | | | $\alpha_{1,2}$ | $\beta_{1,2}$ | $\gamma_{1,2}$ | δ | | |
| Ko=0.5 | L= 0.5D | 상반 | 2.55/52.90 | 0.64/13.28 | 0.68/14.11 | 0.85/17.64 | 4.82 | 60 | 12 | 13 | 15 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.10/2.07 | | | 0 | 0 | 85 | |
| | L= 1.0D | 상반 | 2.31/52.26 | 0.53/12.00 | 1.08/24.44 | 0.42/9.50 | 4.42 | 58 | 12 | 22 | 8 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.08/1.80 | | | 28 | 14 | 50 | |
| | L= 2.0D | 상반 | 2.2/53.26 | 0.53/12.83 | 1.20/29.07 | 0.13/3.15 | 4.13 | 58 | 13 | 27 | 2 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.07/1.69 | | | 53 | 15 | 30 | |
| | L= 4.0D | 상반 | 2.17/53.90 | 0.52/13.00 | 1.24/33.10 | 0/0 | 4.02 | 59 | 13 | 28 | 0 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0/0 | | | 70 | 15 | 15 | |
| Ko=1.0 | L= 0.5D | 상반 | 2.5/53.10 | 0.60/12.74 | 0.70/14.86 | 0.77/16.30 | 4.71 | 72 | 14 | 7 | 7 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.14/3.00 | | | 0 | 0 | 93 | |
| | L= 1.0D | 상반 | 2.35/54.02 | 0.50/11.49 | 0.97/22.30 | 0.43/9.89 | 4.35 | 68 | 14 | 14 | 4 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.10/2.30 | | | 53 | 14 | 29 | |
| | L= 2.0D | 상반 | 2.15/53.62 | 0.53/13.21 | 1.18/29.43 | 0.15/3.74 | 4.01 | 65 | 14 | 20 | 1 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0/0 | | | 65 | 15 | 19 | |
| | L= 4.0D | 상반 | 2.16/54.15 | 0.48/12.45 | 1.28/33.40 | 0/0 | 3.92 | 59 | 12 | 29 | 0 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0/0 | | | 65 | 20 | 15 | |
| Ko=2.0 | L= 0.5D | 상반 | 2.30/24.52 | 2.16/23.03 | 3.01/32.09 | 1.50/15.99 | 9.38 | 66 | 15 | 17 | 2 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.41/4.37 | | | 0 | 0 | 98 | |
| | L= 1.0D | 상반 | 2.09/24.47 | 1.81/21.19 | 4.08/47.78 | 0.43/5.04 | 8.54 | 63 | 15 | 21 | 1 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.13/1.52 | | | 25 | 24 | 50 | |
| | L= 2.0D | 상반 | 1.93/23.92 | 1.71/21.79 | 4.43/54.89 | 0/0 | 8.07 | 62 | 15 | 23 | 0 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0/0 | | | 33 | 33 | 34 | |
| | L= 4.0D | 상반 | 1.93/23.92 | 1.71/21.79 | 4.43/54.89 | 0/0 | 8.07 | 62 | 15 | 23 | 0 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0/0 | | | 33 | 33 | 34 | |

영향을 고려하기 위하여 4, 5등급 암반의 경우 벤치길이 (미니벤치, 쏫벤치)를 고려하여 각각 터널 폭(D)의 0.5D, 1.0D, 2.0D, 4.0D를 적용하여 해석을 수행하였다.

표 10~13은 상하반 분할굴착에 대한 수치해석의 결과이며, 그림 5, 6은 4, 5등급 측압계수(K_o=1.0)에 대한 3차원 해석과 2차원 해석의 결과 비교 그래프이다. 그림 7, 8은 암반등급에 따른 벤치길이별 하중분배율에 대한 그래프이다.

표 10, 11에서와 같이 TYPE-4의 3차원, 2차원 해석 결과는 측압계수가 0.5~1.0인 경우 각각 굴착단계에서 1.72~1.52 mm, 2.55~2.16 mm, 연성 S/C 및 R/B 단계에서 0.42~0.35 mm, 0.64~0.48 mm, 경성 S/C 단계에서 0.44~1.00 mm, 0.68~1.28 mm, 굴진면 전진단계에서 0.56~0.00 mm, 0.85~0.00 mm로 총 변위량이 약 1

mm정도 차이를 보이는 반면 측압계수가 2.0인 경우 굴착단계에서 0.99~0.95 mm, 2.30~1.93 mm, 연성 S/C 및 R/B 단계에서 0.85~0.86 mm, 2.16~1.71 mm, 경성 S/C 단계에서 1.30~2.18 mm, 3.01~4.43 mm, 굴진면 전진 단계에서 0.65~0.00 mm, 1.50~0.00 mm로 각각 2차원 해석 결과의 변위량이 3차원 해석 결과의 총 변위량보다 약 2배 정도 많이 발생하였음을 알 수 있다. 이는 암반등급이 불량한 4등급의 측압계수가 2.0인 경우 벤치설치 효과로 인한 소성영역 증가에 따른 영향이며 실제로 4등급 암반의 측압계수가 2.0인 경우가 드물기 때문에 2차원 해석을 지양하고 3차원 해석을 수행하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

표 12, 13에서와 같이 TYPE-5의 3차원, 2차원 해석 결과는 측압계수가 0.5인 경우 각각 굴착단계에서 3.29~3.33

표 12. TYPE-5에 대한 3차원 해석 변위 및 변위비 결과

| 구분 | | 굴착 (변위mm/ 변위비%) | 연성S/C+R/B (변위mm/ 변위비%) | 경성S/C (변위mm/ 변위비%) | 굴진면전진 (변위mm/ 변위비%) | 총변위량 (mm) | |
|--------|--------|-----------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|------|
| Ko=0.5 | L=0.5D | 상반 | 3.29/54.11 | 0.61/10.03 | 1.02/16.78 | 0.99/16.28 | 6.08 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.17/2.80 | | |
| | L=1.0D | 상반 | 3.31/53.65 | 0.69/11.18 | 1.59/25.77 | 0.52/8.43 | 6.17 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.06/0.97 | | |
| | L=2.0D | 상반 | 3.32/53.38 | 0.70/11.25 | 1.97/31.67 | 0.22/3.54 | 6.22 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.01/0.16 | | |
| | L=4.0D | 상반 | 3.33/53.28 | 0.70/11.20 | 2.17/34.72 | 0.05/0.80 | 6.25 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0/0 | | |
| Ko=1.0 | L=0.5D | 상반 | 2.47/42.08 | 1.18/20.10 | 1.29/21.98 | 0.79/13.46 | 5.87 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.14/2.39 | | |
| | L=1.0D | 상반 | 2.58/44.79 | 0.63/10.94 | 2.15/37.33 | 0.36/6.25 | 5.76 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.04/0.69 | | |
| | L=2.0D | 상반 | 2.58/44.71 | 0.62/10.75 | 2.40/41.59 | 0.17/2.95 | 5.77 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0/0 | | |
| | L=4.0D | 상반 | 2.62/45.49 | 0.62/10.76 | 2.52/43.75 | 0.05/0.87 | 5.76 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0/0 | | |

표 13. TYPE-5에 대한 2차원 해석 변위 및 변위비 결과

| 구분 | | 굴착 (변위mm/ 변위비%) | 연성S/C+R/B (변위mm/ 변위비%) | 경성S/C (변위mm/ 변위비%) | 굴진면전진 (변위mm/ 변위비%) | 총변위량 (mm) | 하중분배율(%) | | | | |
|--------|---------|-----------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|----------------|---------------|----------------|----------|-----|
| | | | | | | | $\alpha_{1,2}$ | $\beta_{1,2}$ | $\gamma_{1,2}$ | δ | |
| Ko=0.5 | L= 0.5D | 상반 | 5.72/54.58 | 1.19/11.35 | 1.85/17.65 | 1.58/15.08 | 10.48 | 63 | 10 | 13 | 14 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.14/1.34 | | | 0 | 0 | 86 | |
| | L= 1.0D | 상반 | 5.15/54.27 | 1.11/11.70 | 2.36/24.87 | 0.79/8.32 | 9.49 | 62 | 11 | 20 | 7 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0.08/0.84 | | | 14 | 14 | 65 | |
| | L= 2.0D | 상반 | 4.80/54.18 | 0.98/11.06 | 2.77/31.26 | 0.31/3.50 | 8.86 | 61 | 11 | 25 | 3 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0/0 | | | 34 | 15 | 48 | |
| | L= 4.0D | 상반 | 4.62/53.91 | 0.97/11.32 | 2.93/34.19 | 0.05/0.58 | 8.57 | 60 | 11 | 28 | 1 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0/0 | | | 64 | 15 | 20 | |
| Ko=1.0 | L= 0.5D | 상반 | 5.16/41.48 | 2.57/20.66 | 2.90/23.31 | 1.81/14.54 | 12.44 | 70 | 12 | 11 | 7 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0/0 | | | 0 | 0 | 93 | |
| | L= 1.0D | 상반 | 5.05/45.13 | 1.48/13.23 | 3.88/34.67 | 0.78/6.97 | 11.19 | 72 | 9 | 16 | 3 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0/0 | | | 15 | 15 | 67 | |
| | L= 2.0D | 상반 | 4.80/45.85 | 1.17/11.17 | 4.26/40.69 | 0.24/2.29 | 10.47 | 71 | 8 | 20 | 1 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0/0 | | | 40 | 15 | 44 | |
| | L= 4.0D | 상반 | 4.71/44.90 | 1.10/10.49 | 4.37/41.66 | 0.08/0.76 | 10.49 | 71 | 8 | 20.5 | 0.5 |
| | | 하반 | 0/0 | 0/0 | 0/0 | | | 65 | 15 | 19.5 | |

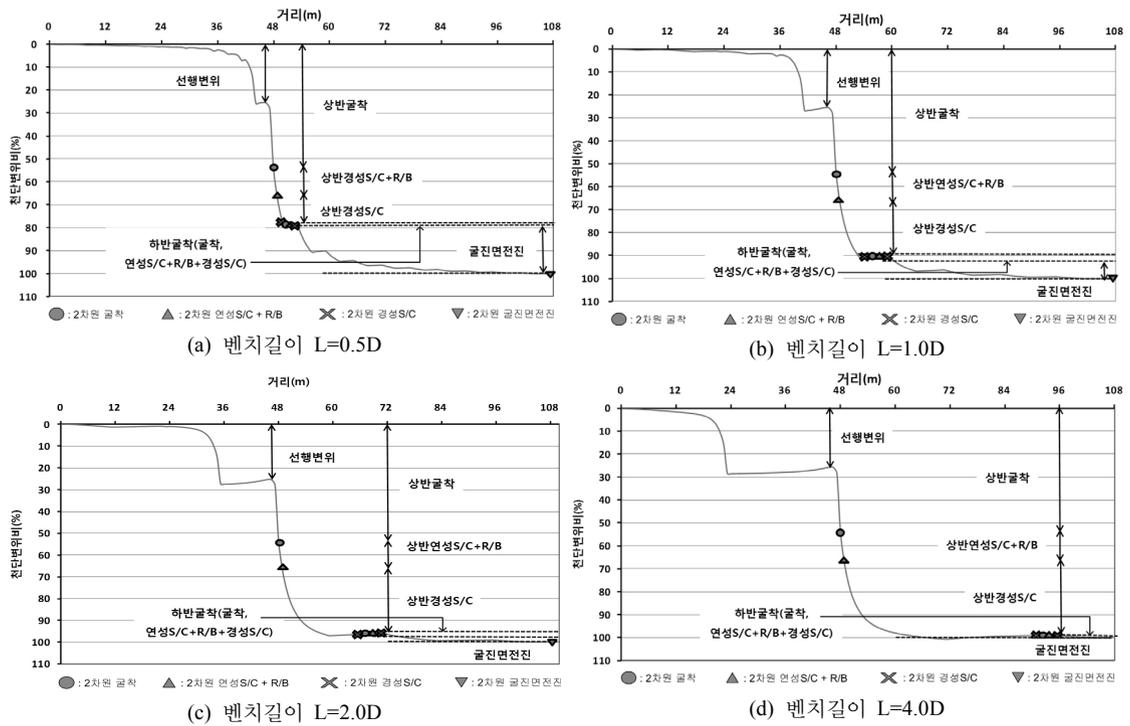


그림 5. 4등급 암반($K_0=1.0$)에 대한 벤치길이별 3차원 해석과 2차원 해석의 결과

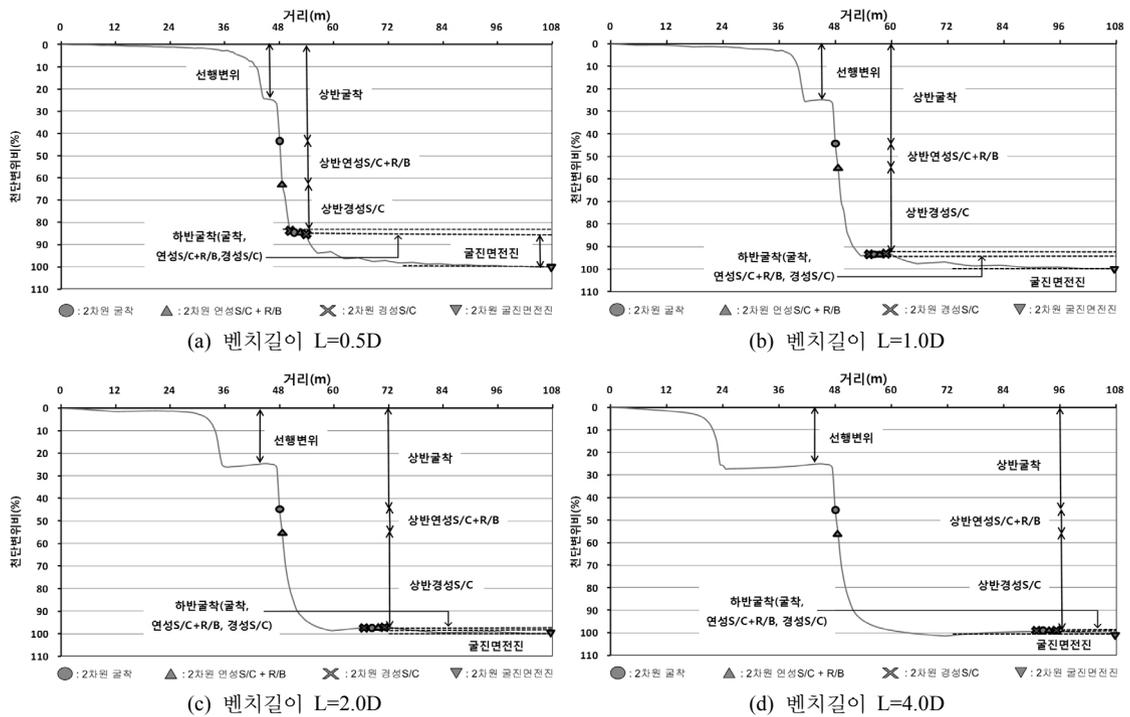


그림 6. 5등급 암반($K_0=1.0$)에 대한 벤치길이별 3차원 해석과 2차원 해석의 결과

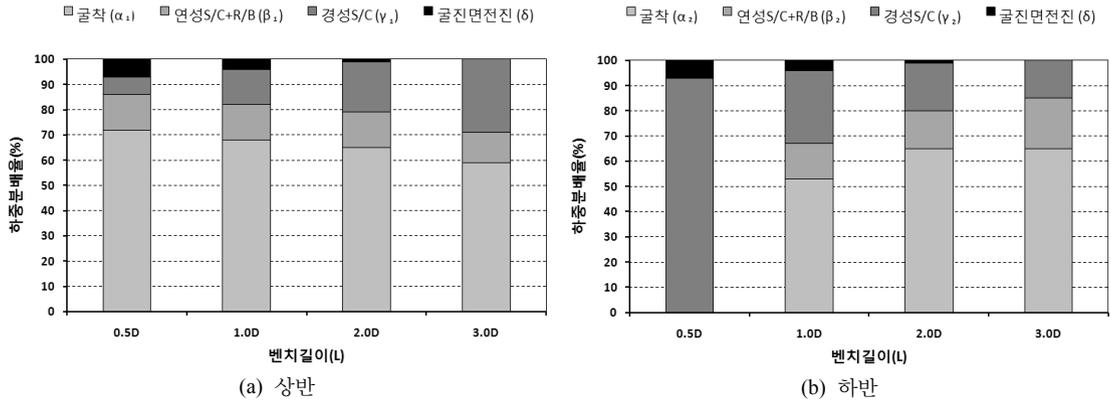


그림 7. TYPE-4의 벤치길이에 따른 하중분배율(K₀=1.0)

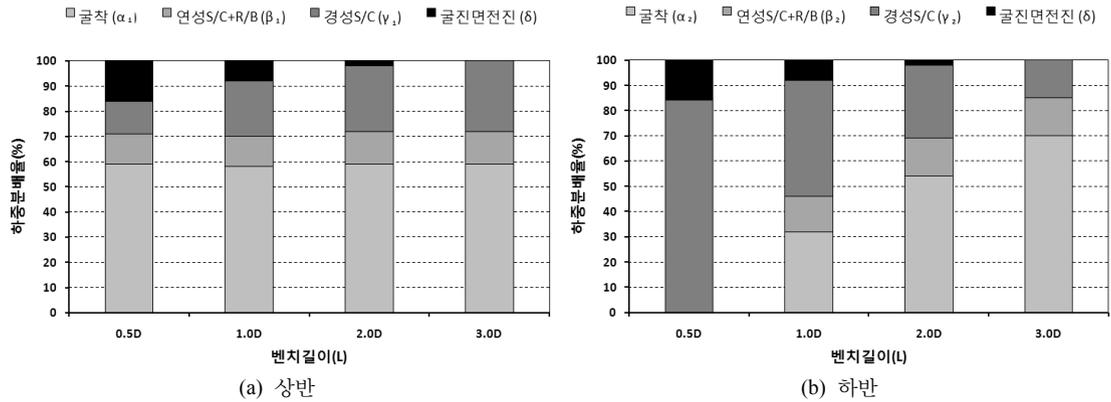


그림 8. TYPE-5의 벤치길이에 따른 하중분배율(K₀=1.0)

mm, 5.72~4.62 mm, 연성 S/C 및 R/B 단계에서 0.61~0.70 mm, 1.19~0.97 mm, 경성 S/C 단계에서 1.02~2.17 mm, 1.85~2.93 mm, 굴진면전진 단계에서 0.99~0.05 mm, 1.58~0.05 mm로 총 변위량은 약 2~3 mm 정도 차이를 보인다. 그러나 축압계수가 1.0인 경우 2차원 해석 결과의 총 변위량이 3차원 해석 결과의 총 변위량보다 약 2배 정도 많이 발생하였음을 알 수 있다. 이는 벤치설치 효과로 인한 소성영역의 증가에 따른 영향이며 불량한 암반일수록 축압계수에 대한 영향을 많이 받아 4등급 암반의 축압계수가 2.0인 경우와 같이 2차원 해석을 지양하고 3차원 해석을 수행하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

표 10~13에서 각 단계별 변위비는 3차원 및 2차원 해석 결과가 상당히 유사함을 알 수 있다. 또한 벤치길이가 0.5D에서 4.0D로 증가함에 따라서 경성 S/C 단계의 변위비는 증가하고, 굴진면 전진비는 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 벤치길이가 증가함에 따라 벤치에 의한

굴진면 지지효과가 소멸하기 때문인 것으로 판단된다.

그림 5, 6의 그래프에서 0 m는 굴착 시작점을 48 m는 천단변위 측정 기준 위치를 나타내고 측정 지점 48 m에 가까워질수록 천단변위비가 급격히 증가하며, 측정 지점에서 멀어질수록 천단변위비는 감소한다. 굴착 영역이 끝나는 112 m에 가까워짐에 따라 천단 변위비의 변동이 거의 없이 수렴하는 것을 알 수 있었다. 또한 벤치길이가 길어짐에 따라 변위비는 줄어들며, 벤치길이 2.0D 이상일 경우 하반 경성 S/C비와 굴진면전진비는 거의 없었다. 벤치길이가 2.0D 이상일 경우 굴진면전진에 대한 영향이 거의 없으므로 굴진면전진 영향인자를 고려하지 않아도 된다.

표 10~13 및 그림 5~8에서 벤치길이가 길어질수록 상반 굴진면부의 하중분배율(α_1)은 감소하며, 경성 S/C 단계 하중분배율(γ_1)은 7~29%로 증가하였다. 하반의 경우에 굴진면부 하중분배율(α_2)은 증가하며 경성 S/C 단계 하중분배율(γ_2)은 감소하였다. 또한 굴진면 전진

단계의 하중분배율(d)은 15.00~0.00%로 점차 감소하다가 벤치 길이가 4.0D 이상이 되면 거의 0에 근접하였다. 이로써 벤치의 길이가 짧을수록 굴진면 지지효과가 더 발휘되는 것을 확인하였으며, 일반적인 롱벤치 공법의 경우에는 네 번째 요소인 δ 의 도입이 필요 없음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 2차로 고속도로 터널 단면에 대해 측압계수와 굴착방법을 고려하여 하중분배율을 결정하였다. 이를 위해 시공단계를 정확하게 고려하여 3차원 해석을 수행하고, 이와 동일한 결과를 나타내는 2차원 해석 결과를 얻고자 천단변위비를 기준으로 하여 하중분배율을 결정하였다. 측압계수는 국내 초기지압 측정 결과를 바탕으로 0.5, 1.0 및 2.0으로 하였으며, 암반 등급에 따라 전단면 굴착과 상하 분할굴착으로 굴착 방법을 구분하였으며, 분할굴착의 경우에 있어서도 벤치 길이를 4가지로 구분하여 해석하고 비교적 다양한 시공 조건에 대해 정확하고 합리적으로 하중분배율을 결정하는 방법을 제시하였다. 본 연구를 통해 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 전단면 굴착의 경우;
 - 1) 전단면 굴착 과정은 초기 굴착 단계를 나타내는 α 와 연성 슛크리트 및 록볼트 설치 단계를 나타내는 β , 그리고 경성 슛크리트 및 굴진면의 충분한 전진을 나타내는 γ 로써 해석이 가능하였다.
 - 2) 변형계수로 대표되는 암반조건이 양호할수록 굴진면부 하중분배율 (α)은 증가하는 반면 경성 슛크리트부 하중분배율(γ)은 감소하였다.
 - 3) 측압계수가 증가하면 대체로 굴진면부와 경성 슛크리트부 하중분배율(α 와 γ)은 감소하고 연성 슛크리트부 하중분배율(β)은 증가하였다. 그러나, 지보타입 3에서 측압계수가 2.0인 경우에는 터널 크라운부에 소성영역이 발생하여 지반상태가 상대적으로 불량해져 굴진면부와 연성 슛크리트 하중분배율(α 와 β)은 감소하고 경성 슛크리트부 하중분배율(γ)은 증가하였다.
 - 4) 굴진장이 증가할수록 굴진면부 하중분배율은 증가하며, 슛크리트의 두께가 증가하면 굴진면부 하중분배율은 감소하는 반면, 경성 슛크리트부의 하중분배율은 증가하였다.

2. 상하 분할굴착의 경우;
 - 1) 상하 분할굴착의 경우, 하반의 굴착이 완료된 후에도 벤치의 길이에 따라 굴진면의 영향이 잔존하므로 α , β , γ 외에 굴진면 전진효과를 반영할 수 있는 4 번째 요소인 δ 의 도입이 필요하였다.
 - 2) 굴진면부에서의 천단변위는 굴착지반이 양호하고 벤치의 길이가 길어질수록 감소하였다. 반면 측압계수가 증가하면 천단변위는 감소하였다.
 - 3) 벤치길이가 길어지면 상반 굴진면부의 하중분배율 (α_1)은 감소하며, 연성 슛크리트부 하중분배율(β_1)의 변화는 거의 없고, 경성 슛크리트부의 하중분배율(γ_1)은 증가하였다. 하반의 경우에 굴진면부 하중분배율(α_2)은 증가하며, 경성 슛크리트부의 하중분배율(γ_2)은 감소하였다. 또한 굴진면 전진부의 하중분배율(δ)은 벤치길이가 길어질수록 점차 감소하다가 벤치 길이가 4.0D 이상이 되면 거의 0에 근접하였다. 따라서 일반적인 롱벤치 공법의 경우에는 네 번째 요소인 δ 의 도입이 필요 없음을 알 수 있다.
 - 4) 지반조건이 불량한 4등급 이하의 암반에서 측압계수가 2.0일 경우에는 소성영역의 광범위한 발달로 인해 3차원 해석 결과와 2 차원 해석 결과에서 천단변위의 총량에 큰 차이가 있었다. 3차원 해석 결과에 부합하는 2차원 해석 결과를 얻기 위해 많은 노력이 있었으나, 그 결과는 만족스럽지 못하였다. 현실적으로 이렇게 불량한 암반에서 측압계수가 2.0 이상일 가능성은 매우 희박하지만, 그러한 경우를 만나게 되면 2차원 해석의 한계성을 고려하여 실제 시공단계를 반영한 3차원 해석을 수행하는 것이 보다 합리적인 것으로 판단된다.

본 연구 결과는 해석대상의 지반이 하나의 균질한 단일 지층으로 가정하고, Q 값을 근거로 한 암반분류에 따른 지반 물성을 적용한 가정 조건에 대한 것이다. 복잡한 지층으로 구성되어 지반조건이나 물성이 다양한 경우에는 이들을 추가로 고려한 하중분배율의 결정에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

이 논문의 작성을 위해 도움을 주신 선진엔지니어링의 정수봉 과장, 김의석 대리과 수원대학교 대학원의 김대영, 박준형, 문형석, 이종원 학생들과 MIDAS GTS 프로그램을 지원해주신 (주)마이다스아이티 임직원분들께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. 박성록, 1999, 터널 단면형상 및 측압계수(Ko) 변화에 따른 2차원 해석 모델의 하중 분배율에 관한 연구, 석사학위논문, 한양대학교.
2. 김사현, 2010, NATM 터널의 2차원 해석을 위한 하중분배율 산정연구, 석사학위논문, 수원대학교.
3. 정대열, 1993, 터널 막장 주위의 3차원적 영향을 고려하는 2차원 해석 모델의 하중분배율에 관한 연구, 박사학위논문, 서울대학교.
4. 장석부, 문현구, 1998, 터널설계 조건을 고려한 하중분배율의 정량적 산정에 관한 연구, 한국지반공학회 논문집, 제14권, 제5호, pp. 87-108.
5. 이송, 안태훈, 2003, 지반응답곡선에 의한 터널 특성 연구, 대한토목 학회논문집 pp. 61-62.
6. Bieniawski, Z. T., 1989, Engineering Rock Mass Classifications, John Wiley&Sons, pp. 251.
7. Barton, 1995, Permanent support for tunnels using NMT, 한국암반역학회 및 대한지질공학회 학술발표회, pp. 1-26.
8. 박연준, 2002, 암반상태 및 굴착조건에 따른 안정성 해석, 한국도로 공사 도로교통기술원, 연구보고서, pp. 1-10.
9. 한국도로공사, 2008, 고속국도 제 551호선 남해고속도로 (냉정~부산간) 확장공사 실시설계, 종합보고서.
10. 한국도로공사, 2009, 고속국도 제 65호선 울산~포항간 고속도로 건설공사, 종합 보고서.
11. 한국도로공사, 2009, 고속국도 제 30호선 상주~영덕간 고속도로 건설공사, 종합 보고서.
12. 한국도로공사, 2010, 고속국도 제 600호선 부산외곽순환 고속도로 건설공사 실시설계, 종합 보고서.
13. 이상돈, 김낙영, 김동인, 2002, 암반등급에 따른 도로터널 지보 체계 개선 연구 (I), 연구보고서, 한국도로공사 도로교통기술원.



박연준

1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1983년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1992년 미국 Minnesota 대학교 대학원 토목공학과 공학박사

Tel: 031-220-2580
E-mail: yjpark@suwon.ac.kr
현재 수원대학교 토목공학과 교수



유일형

1992년 단국대학교 공과대학 토목공학과 공학사
1994년 단국대학교 공과대학 토목공학과 공학석사

Tel: 011-470-5730
E-mail: tysen11@empal.com
현재 제이디에코(주) 부사장