

# 대심도 풍화대층에서 NATM 터널의 지반거동 및 보강방법

## Ground Behavior and Reinforcing Methods of NATM Tunnel through Deep Weathered Zone

천 병 식<sup>1</sup> Chun, Byung-Sik

송 승 훈<sup>2</sup> Song, Seung-Hoon

안 정 환<sup>3</sup> An, Jung-Whan

### Abstract

This study analyzed ground settlement and ground stress depending on tunnel excavation and the ground reinforcing grouting methods for double line road tunnel through deep weathered zone. Diameter of double line road tunnel was approximately 12m and umbrella arch method and side wall reinforcing grouting were applied. The ring-cut split excavation method and CD-cut excavation method for excavation method were applied. Analyses of failure rate and vertical stress ratio show that the tunnel for which the height of the cover (H) was higher than four times the diameter, can be considered a deep tunnel. Comparisons of various excavation and ground reinforcement methods showed that CD-cut method results in lower surface and crown settlement, and lower failure rate than that obtained by Ring-cut split method. In addition, the side wall reinforcing grouting resulted in reduction of tunnel displacement and settlement.

### 요 지

본 연구에서는 대심도 풍화대에 시공되는 2차로 도로터널을 기준으로 터널의 굴착방법과 지반보강그라우팅에 의한 지반변위 및 지반응력의 분석을 통하여 최적의 시공방안을 찾고자 하였다. 터널 직경은 약 12m를 적용하였으며, 상부 강관다단그라우팅 및 측벽 보강그라우팅을 적용하였다. 검토된 굴착방법은 링컷 굴착방법과 중벽분할 굴착방법이다. 터널 천단의 소성율과 연직응력비를 분석한 결과, 풍화대지반에 굴착되는 터널에서 토피고(H)가 터널직경(D)의 4배 이상일 경우(H>4D) 대심도 터널로 판단할 수 있었다. 해석결과 중벽분할 굴착방법이 링컷 굴착방법에 비하여 대심도 풍화대 NATM터널에서 안정성이 높은 굴착방법으로 판단할 수 있었다. 또한, 측벽 보강그라우팅 실시로 터널 내공변위 및 침하 발생을 억제할 수 있었다.

**Keywords :** CD-cut method, Deep tunnel, Ring-cut split method, Side wall reinforcing grouting, Weathered zone

### 1. 서 론

현재 국내의 대부분의 터널은 록볼트, 슛크리트, 강지보 등의 지보재로 굴착 즉시 보강을 하는 NATM공법

으로 시공되고 있다. 이러한 NATM공법은 지반이 양호한 경우에는 일반적인 지보재로도 충분한 지보효과를 기대할 수 있으나, 굴착대상 지반이 연약한 경우 터널의 천단부 및 막장을 굴착 전에 보강하여 터널의 안정성

1 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ., hengdang@unitel.co.kr, 교신저자)

2 금호건설 대리 (Assistant manager, Kumho Engrg. & Construction)

3 정회원, (주)동호 지반공학부 이사 (Member, Director, Geotechnical Division, Dongho Co., Ltd)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 2월 29일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

을 도모하여야 한다.

터널굴착에 따른 굴진면의 안정성을 확보하는 방안으로는 터널단면을 분할하여 굴착하면서 지보를 설치하는 분할굴착법과 굴진면의 강도와 차수성을 강화하는 지반보강법을 들 수 있다. 전통적으로는 인력과 소형장비를 이용한 소단면 분할굴착공법이 많이 적용되어 왔으나, 최근에는 갱내 작업의 기계화와 지반보강 기술의 발전으로 지반보강공법이 선호되고 있다. 즉, 터널굴착에 있어 갱내 대형장비의 작업 효율성 면에서도 갱내 작업공간이 확보되어야 하므로 굴착단면의 크기를 유지하면서 굴진면을 안정시킬 수 있는 보강공법을 적용하는 것이 유리한 경우가 많다(남기천 등, 2002; 최용기, 2003).

이러한 굴진면 보강공법에는 굴착면의 천단을 따라 보강하는 포어폴링, 파이프루프, FRP 다단그라우팅, 강관다단그라우팅(RPUM) 등을 들 수 있는데, 현재 가장 많이 시공되는 공법은 차수와 보강효과를 동시에 얻을 수 있는 강관보강형 RPUM이다. 강관다단그라우팅은 천단부에 강관을 삽입하고, 삽입된 관의 내측에서 주변 지반에 그라우트를 주입함으로써 관과 주입재에 의한 Umbrella 형태의 아치보를 형성시키고, 주입재에 의해 주변지반의 강도를 증진시키는 보강공법으로 1970년대 중반 이탈리아에서 개발되어 국내의 경우 80년대 초에 지하철 일부구간에 시공된 이래 NATM 공법에서 연약 대구간의 보강공법으로 일반화되었다.

굴진면 전방을 굴착 전에 보강 후 터널을 굴착할 때 주변지반의 거동을 판단할 수 있는 방법은 Peck 등(1972), Chambon과 Corté(1990)가 연구한 굴진면 안정의 평형해석에 근거한 안정지수로 판별할 수 있는 간편법, Broms와 Bennermark(1967) 및 이후 여러 연구자들이 시도한 모형실험법, Lo 등(1990)의 3차원적으로 실제 형태와 유사하게 모형화가 가능하고 시공단계를 고려할 수 있는 수치해석방법 등이 있다.

본 연구에서는 수치해석을 통하여 풍화대에 시공되는 터널의 심도를 변수로 하여 지표 및 터널 천단부의 연직응력의 변화를 분석하고 대심도의 기준을 제시하고, 적절한 대심도 풍화대 터널의 굴착방법 및 보강방법을 찾고자 하였다.

## 2. 수치해석

터널 갱구부나 지반조건이 열악한 토사 및 암반터널 공사에서 터널의 안전한 공사를 위하여 일반화되어 있는

RPUM 공법을 적용하여 수치해석을 실시하였다. RPUM의 보강범위는 180°로 검토하였으며, 터널 측벽부의 보강과 무보강으로 구분하여 해석을 수행하였다. 또한, 굴착방법은 링컷굴착과 중벽분할 굴착공법을 적용하고, 굴진면의 압출변위 및 천단침하, 지표침하의 거동특성을 분석하여 최적의 굴착방법을 선정하도록 하였다.

### 2.1 수치해석 프로그램

본 연구에서는 변위법을 사용하여 외력에 대한 연속체 내부 절점의 변위를 우선적으로 구하고, 후처리 과정에서 변형률과 응력을 순차적으로 계산해 나가며 해석을 수행하는 PENTAGON 프로그램을 사용하였다. PENTAGON 프로그램은 해석과정의 초기단계(initial stage)에서 초기 응력상태를 해석하고 굴착단계(construction stage)에서 굴착으로 변화되는 경계조건 및 굴착면을 따라 불평형 절점하중을 계산하며 첨가 또는 제거되는 요소와 물성변화를 입력한다. 그리고 하중단계(load stage)에서는 요소하중, 절점하중과 이전 단계에서 계산한 불평형 절점하중을 입력시켜 응력을 계산한다.

### 2.2 해석조건

본 해석에서는 2차로 도로터널을 기준으로 터널직경  $D=12m$ 를 적용하여 유한요소해석을 실시하였다. 지반의 경계조건은 터널 상부에서는 지표까지로 하며, 터널의 좌우측면 및 하부에서는 해석경계를 터널직경( $D$ )를 기준으로 각각 4D, 3D 이상이 되도록 하여 응력 및 변위의 발생이 해석경계로 인한 오차 발생을 최소화하였다. 터널 굴진면 방향으로는 굴착방법과 상부보강그라우팅에 따른 영향을 확인하기 위하여 터널직경의 3배인 3D를 해석영역으로 하였다.

지반상태는 하나의 균질한 지반(풍화대)으로 가정하였으며, 상부보강그라우팅의 보강재는 Frame요소로 모델링하고 보강된 지반은 강화된 지반 물성치를 적용하였다.

경계조건은 좌, 우의 경계에서 상·하로 이동되며, 하부의 경계부에서 좌·우로만 이동할 수 있도록 하고, 종방향의 시작단면과 끝단면에서는 앞·뒤로의 이동을 방지하도록 각 요소마다 Roller를 설치하였다. 하부의 좌·우측 끝 절점은 고정되며, 나머지 절점에 대해서는 X, Y, Z방향으로 이동이 가능하고 회전에 대해 구속을 갖는 경계조건을 설정하였다. 슛크리트와 상부 보강재의

경계조건은 모든 방향의 변위가 자유롭고 X 및 Y 축의 회전에 대해 자유조건으로 설정하였다.

### 2.3 지반강도 정수 및 지보재의 물성

본 수치해석에 적용된 풍화대의 지반강도정수 및 지보재의 물성 및 제원은 표 1 및 표 2와 같다. 지반의 물성치는 기존설계사례와 문헌상의 자료를 참조하여 설정되었다.

### 2.4 해석심도

풍화대에 시공되는 터널의 대심도 기준을 제시하기

위하여 록볼트와 슛크리트로 시공되는 일반적인 NATM 공법 및 굴착방식으로 상하반단면 분할굴착공법을 적용하여 수치해석을 수행하였다.

토피고를 터널직경 D를 기준으로 1D에서 10D까지 변화시키면서 지표 및 터널 천단의 지하량, 연직응력 및 소성율을 분석하였다(그림 1). 지하량 및 연직응력은 토피고에 따라 직선적인 변화를 보였으나(그림 1(a), (b)), 소성율과 초기응력( $\sigma_i$ )에 대한 응력비( $\sigma/\sigma_i$ )는 토피고가 증가함에 따라 수렴하는 형태로 나타났다.

따라서, 대심도의 기준은 소성율 및 응력비가 수렴하는 심도인 3D~4D로 설정하여 본 해석에서는 대심도에 해당하는 토피고 5D를 적용하였다.

표 1. 지반강도정수

| 구 분   | 탄성계수 (E, tf/m <sup>2</sup> ) | 단위중량 ( $\gamma_t$ , tf/m <sup>3</sup> ) | 내부마찰각 ( $\Phi$ , °) | 점착력 (c, tf/m <sup>2</sup> ) |
|-------|------------------------------|---|---------------------|-----------------------------|
| 풍 화 대 | 30,000                       | 2.1                                     | 33                  | 3.0                         |
| 보강풍화대 | 90,000                       | 2.1                                     | 38                  | 4.5                         |

표 2. 지보재의 물성 및 제원

| 구 분   | 탄성계수 (E, tf/m <sup>2</sup> ) | 규 격 (mm)        | 길 이 (m) | 설치간격 (m)      | 천공각도 (°) |
|-------|------------------------------|-----------------|---------|---------------|----------|
| 스츝크리트 | 500,000                      | t=200           | -       | -             | -        |
| 강 관   | 20,000,000                   | $\Phi=60$ , t=4 | 12      | 0.5(횡)/6.0(종) | 10°      |

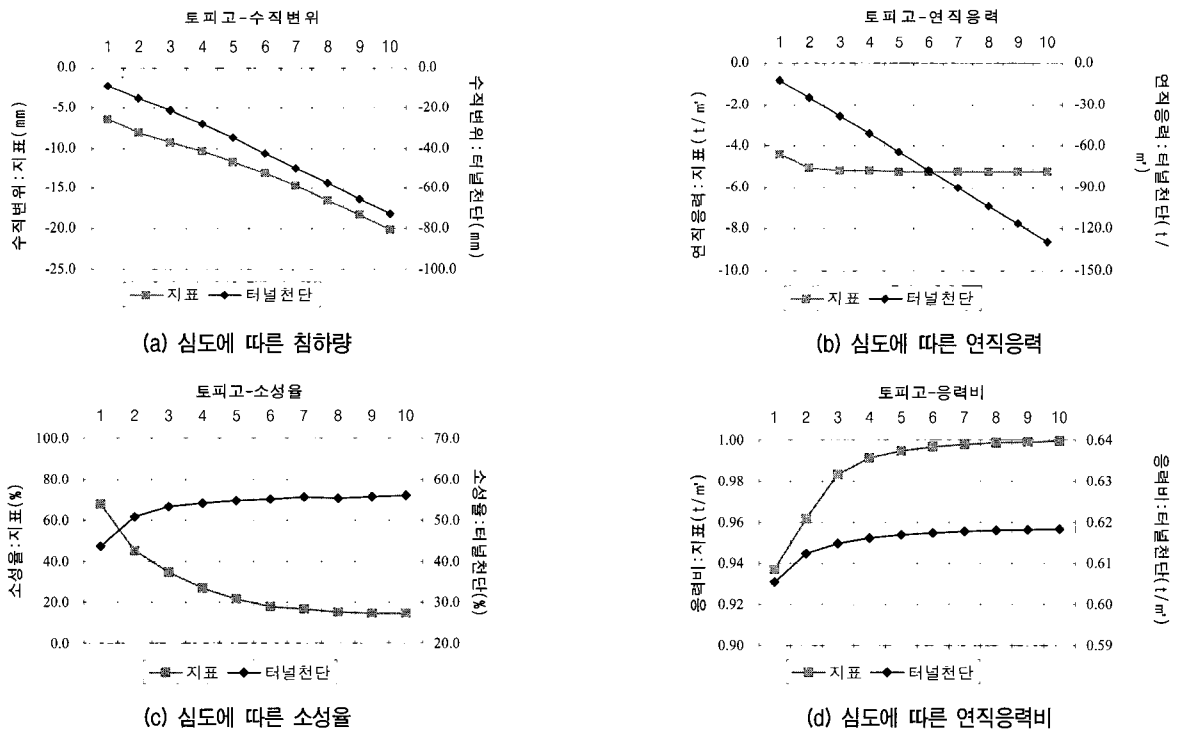


그림 1. 심도에 따른 지반 및 터널의 거동

## 2.5 해석변수 및 해석순서

본 연구에서는 대심도 풍화대 지반에 시공되는 NATM 터널의 최적 시공방법을 찾기 위하여 표 3과 같이 굴착

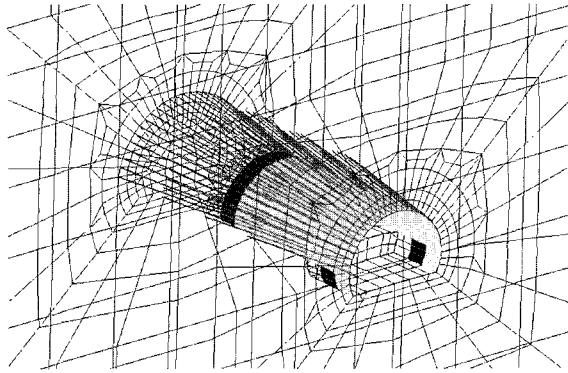
방법 및 보강방법에 대하여 수치해석을 실시하였다. 굴착방법은 링컷 굴착과 중벽분할굴착 방법으로 구분하였으며, 보강방법은 상부보강(UPUM, Reinforced Protective Umbrella Method)을 기본으로 하고 측벽보강

표 3. 굴착 및 보강방법별 해석조건

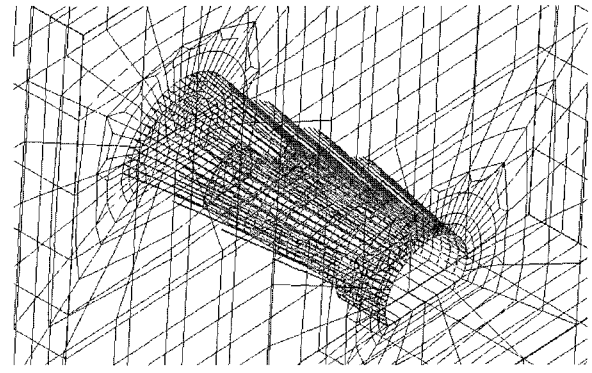
| 구 분 | 굴착방법               |                    | 보강방법                   |                          |
|-----|--------------------|--------------------|------------------------|--------------------------|
|     | 링컷굴착<br>(Ring Cut) | 중벽분할굴착<br>(CD Cut) | 상부보강<br>(Up Reinforce) | 측벽보강<br>(Down Reinforce) |
| RU  | ●                  |                    | ●                      |                          |
| RUD | ●                  |                    | ●                      | ●                        |
| CU  |                    | ●                  | ●                      |                          |
| CUD |                    | ●                  | ●                      | ●                        |

표 4. 해석순서

| 해석모델                           | 해석 모식도   |  |
|--------------------------------|----------|--|
| RU<br>링컷굴착<br>+<br>상부보강        |          |  |
| RUD<br>링컷굴착<br>+<br>상부(측벽)보강   |          |  |
| CU<br>중벽분할굴착<br>+<br>상부보강      | 좌측<br>굴착 |  |
|                                | 우측<br>굴착 |  |
| CUD<br>중벽분할굴착<br>+<br>상부(측벽)보강 | 좌측<br>굴착 |  |
|                                | 우측<br>굴착 |  |



(a) 링컷굴착(RU, RUD)의 해석모델링



(b) 중벽분할굴착(CU, CUD)의 해석모델링

그림 2. 해석모델링

그라우팅의 적용 여부에 따라 구분하였다.

해석은 상부보강, 터널굴착, 지보재 설치의 순서로 수행하였으며, 각 해석모델에 따른 굴착 및 지보재 설치의 순서는 표 4와 같다. 우선 초기지반상태를 모형화한 후 상부보강을 실시한다. 상부보강 완료 후 굴착과 지보재 설치를 반복한다. 링컷 굴착방법을 적용할 경우 링컷굴착 후 4m 간격을 두고 벤치를 굴착하며, 하부 반단면은 벤치와 10m의 이격거리를 두고 굴착한다. 또한 측벽 보강을 적용하는 경우 하부반단면 굴착 6m 이전에 측벽 보강이 이루어지도록 하였다. 중벽분할 굴착방법을 적용할 경우 RPUM 시공간격인 6m 마다 좌측굴착 후 우측굴착, 이후 상부보강 순으로 수행하고, 하부반단면 굴착 및 측벽보강은 링컷 굴착방법 적용시와 동일하게 시행한다. 그림 2에서는 모형화된 해석조건을 나타내었다.

### 3. 해석결과

터널굴진면의 위치는 링컷 굴착방법과 중벽분할 굴착방법에 따라 차이가 있으나 크게 1차굴착, 2차굴착, 3차굴착으로 구분하여 결정하였다. 링컷 굴착방법인 RU 및 RUD에서 1차굴착은 링컷굴착, 2차굴착은 벤치굴착, 3차굴착은 하부반단면 굴착으로 하였으며, 중벽분할 굴착방법인 CU 및 CUD에서는 1차굴착, 2차굴착, 3차굴착을 각각 좌측상부굴착, 우측상부굴착, 하부반단면굴착으로 구분하였다.

굴진거리는 굴진면까지의 거리로, 굴착전은 (-), 굴착 후는 (+)로 표기하였다.

### 3.1 지반변위

지표침하는 1~3차 굴착 모두 중벽분할 굴착방법을 적용할 경우 링컷 굴착방법에 비하여 13~17% 가량 작게 나타났다. 2차굴착에 의한 굴진면이 축점을 통과하기까지는 1차굴착인 링컷굴착과 좌측상부굴착으로 인하여 침하량에 차이가 발생하지만 2차굴착으로 상부반단면이 모두 굴착되어 발생하는 지표침하량은 굴착방법에 따라 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나, 굴착이 계속 진행되어 하부반단면 굴착이 진행되면 중벽분할 굴착방법이 링컷 굴착방법에 비하여 13%가량 지표침하가 작게 발생하였다.

측벽을 보강함에 따라 굴착방법에 관계없이 측벽을 보강하는 2차굴착 이후 지표침하가 감소하였으며, 굴착을 진행함에 따라 보강효과도 증가하였다. 링컷 굴착방법 및 중벽분할 굴착방법 모두 약 4%의 보강효과를 보였다.

천단침하는 지표침하와 비슷한 경향으로 나타났다. 즉, 중벽분할 굴착방법을 적용하면 링컷 굴착방법에 비하여 1차굴착시 침하량이 24% 작게 발생하나, 상부반단면을 모두 굴착하는 2차굴착에 따라 발생하는 천단침하량은 차이가 나타나지 않았다. 또한 하부반단면을 굴착하는 3차굴착으로 링컷 굴착방법보다 중벽분할굴착방법이 5% 작은 천단침하를 보였다.

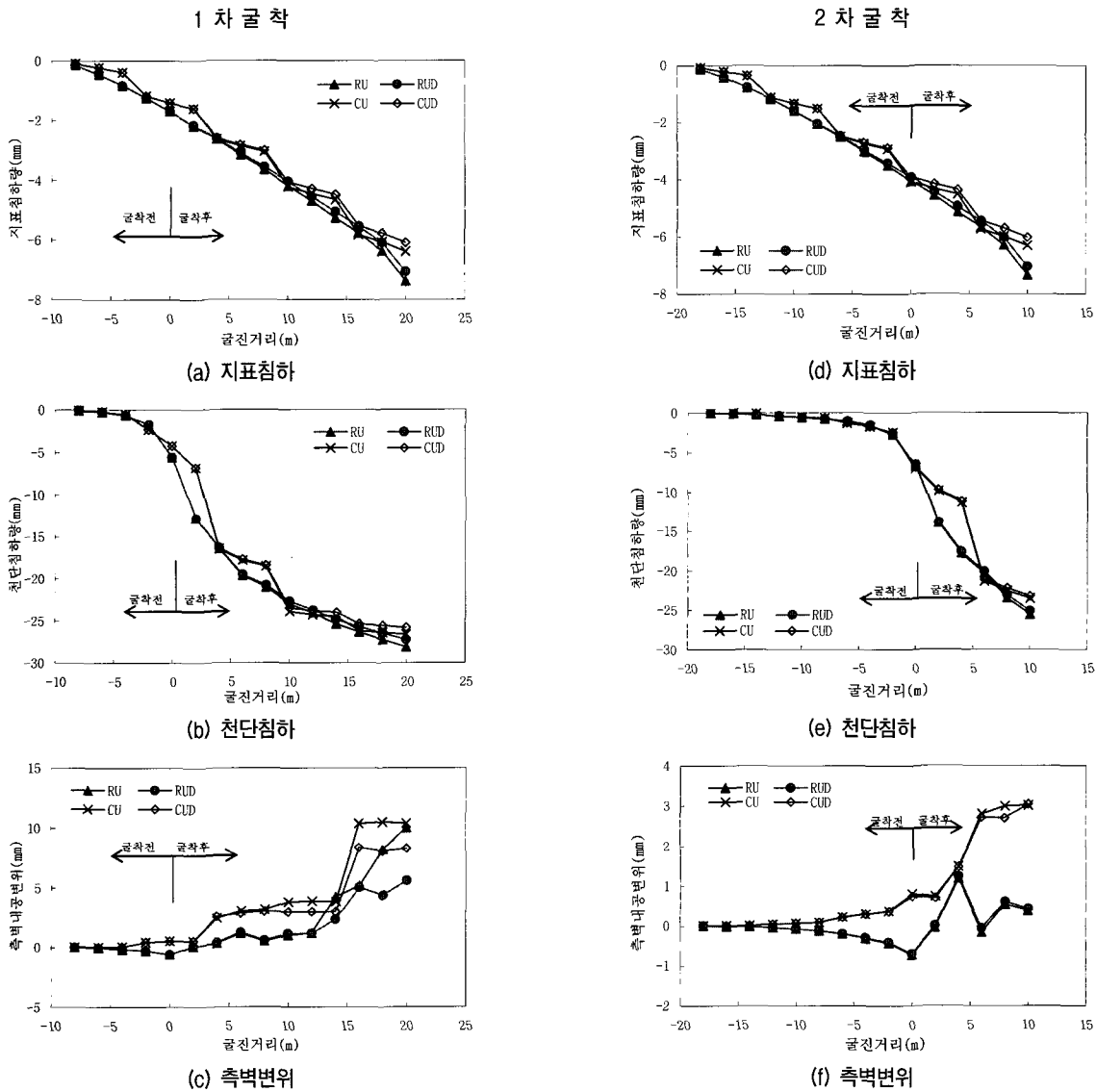
측벽을 보강함에 따라 굴착방법에 관계없이 측벽을 보강하는 2차굴착 이후 천단침하가 감소하였으며, 굴착을 진행함에 따라 보강효과도 증가하였다. 링컷 굴착방법 및 중벽분할 굴착방법 모두 약 3%의 보강효과를 보였다.

측벽변위는 지표 및 천단침하와는 달리 중벽분할굴

표 5. 굴착진행에 따른 지반변위 (단위 : mm)

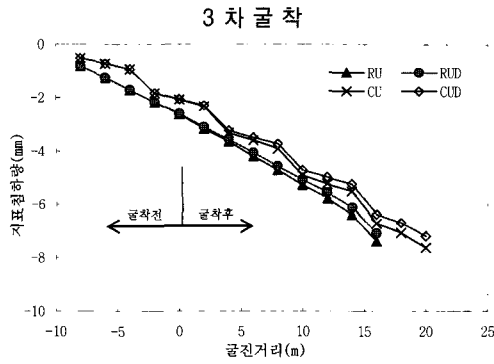
| 구분         | 측정 시점             | RU     | RUD    | CU     | CUD    |
|------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|
| 지표침하       | 링컷(좌측) 굴착 통과시     | 1.699  | 1.699  | 1.410  | 1.410  |
|            | 벤치(우측) 굴착 통과시     | 2.621  | 2.600  | 2.619  | 2.585  |
|            | 하부반단면 굴착 통과시      | 5.276  | 5.067  | 4.658  | 4.484  |
|            | 하부굴착 굴진면 0.5D 통과시 | 7.378  | 7.075  | 6.397  | 6.101  |
| 천단침하       | 링컷(좌측) 굴착 통과시     | 5.583  | 5.583  | 4.245  | 4.245  |
|            | 벤치(우측) 굴착 통과시     | 16.385 | 16.331 | 16.436 | 16.305 |
|            | 하부반단면 굴착 통과시      | 25.397 | 24.872 | 24.496 | 24.013 |
|            | 하부굴착 굴진면 0.5D 통과시 | 28.136 | 27.231 | 26.611 | 25.813 |
| 측벽<br>내공변위 | 링컷(좌측) 굴착 통과시     | 0.590  | 0.590  | 0.530  | 0.530  |
|            | 벤치(우측) 굴착 통과시     | 0.344  | 0.375  | 2.465  | 2.598  |
|            | 하부반단면 굴착 통과시      | 4.254  | 2.346  | 3.843  | 3.003  |
|            | 하부굴착 굴진면 0.5D 통과시 | 10.034 | 5.604  | 10.383 | 8.306  |

주) RU : 링컷굴착방법+상부보강      RUD : 링컷굴착방법+(상부+측벽)보강  
 CU : 중벽분할굴착방법+상부보강      CUD : 중벽분할굴착방법+(상부+측벽)보강

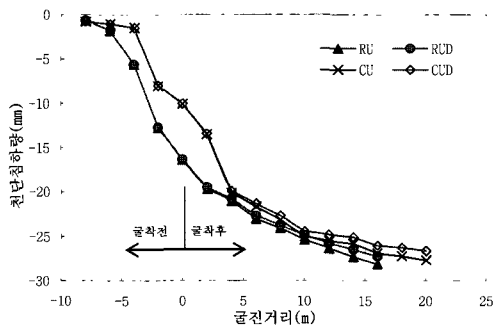


RU : 링컷굴착+상부보강      RUD : 링컷굴착+상부보강+측벽보강  
 CU : 중벽분할굴착+상부보강      CUD : 중벽분할굴착+상부보강+측벽보강

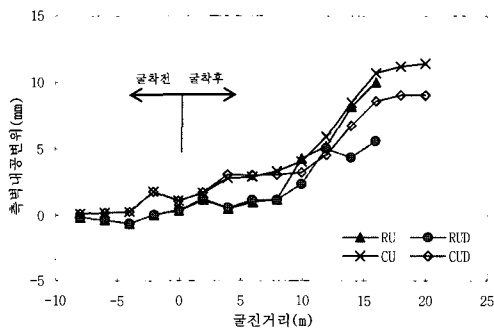
그림 3. 터널굴착에 따른 지반변위



(g) 지표침하

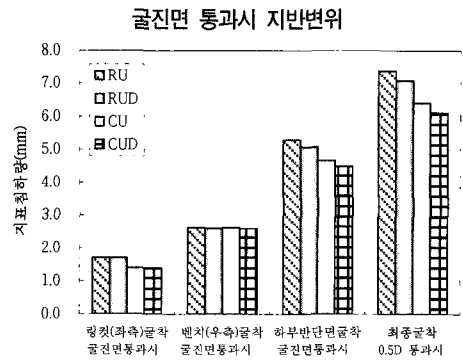


(h) 천단침하

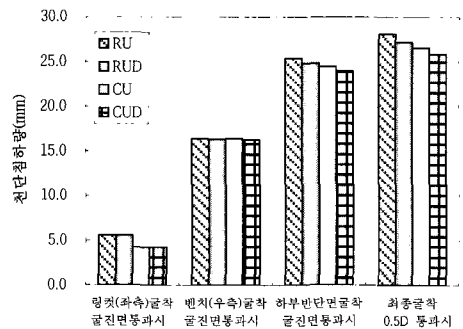


(i) 측벽변위

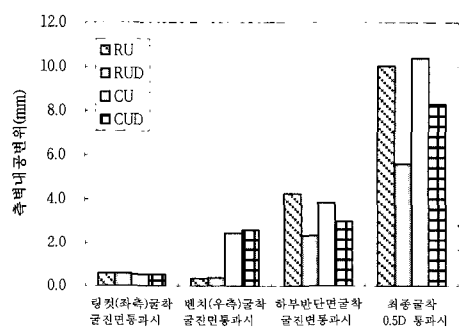
RU : 링컷굴착+상부보강  
 CU : 중벽분할굴착+상부보강



(j) 지표침하



(k) 천단침하



(l) 측벽변위

RUD : 링컷굴착+상부보강+측벽보강  
 CUD : 중벽분할굴착+상부보강+측벽보강

그림 3. 터널굴착에 따른 지반변위 (계속)

착을 적용하는 경우 전체적으로 더 큰 변위량이 나타났다. 상부반단면을 모두 굴착하는 2차굴착시 7배 가량 크게 나타났으며, 하부반단면 굴착이 계속 진행됨에 따라 3% 정도 큰 측벽변위를 보였다.

측벽을 보강함에 따라 측벽내공변위가 감소하였으며, 링컷 굴착방법은 약 44%, 중벽분할 굴착방법은 약 22%의 보강효과를 보이므로 측벽보강효과는 링컷 굴착방법이 더 우수함을 알 수 있었다.

### 3.2 지중응력

터널굴착으로 인하여 발생하는 3차원적인 지중응력

을 분석하였으며, 터널 횡방향으로 작용하는 지중응력을 수평응력, 중력방향을 연직응력, 터널 굴진면방향의 지중응력을 종방향응력으로 정의하였다. 단계별로 굴착되는 지중응력  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 의 변화를 초기 지중응력  $\sigma_i$ 에 대한 응력비( $\sigma_{x,y,z}/\sigma_i$ )는 그림 4와 같다.

천단부의 연직응력은 터널굴착에 따른 응력해방과 종방향 아칭효과로 인하여 굴진면이 측점에 도달하기 이전에는 약간 증가하다가 굴진면이 통과하는 시점에서 5m 추가 굴착구간까지 급격히 감소하고, 측점 통과 후 수렴된다. 천단부를 한번에 굴착하는 링컷굴착을 적용할 경우가 절반씩 분할굴착하는 중벽분할굴착방법에 비하여 빠른 단계에서 연직응력이 감소하고, 최종단계

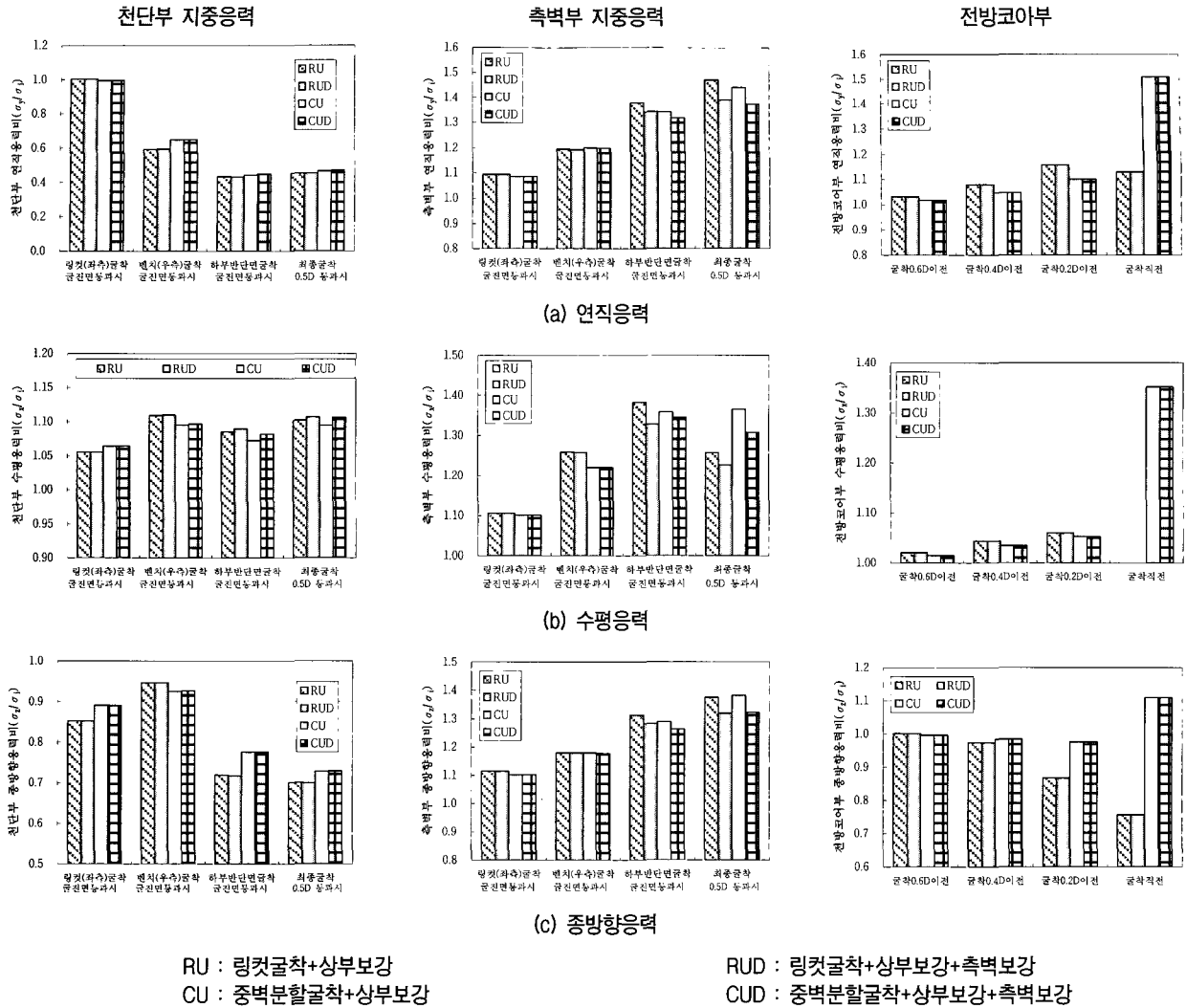


그림 4. 터널굴착에 따른 주변지반의 지중응력

에서  $20\text{kN/m}^2$  정도 많이 감소하며, 측벽의 보강효과는 두드러지지 않았다.

천단부의 수평응력은 링컷 굴착방법이 중벽분할 굴착방법에 비하여 응력증가량이 크게 발생하였다. 터널 상부 굴착시 벤치를 남겨두는 링컷 굴착방법은 상부의 좌측과 우측을 분할굴착하는 중벽분할 굴착방법에 비하여 천단의 연직응력이 수평응력으로 변이가 큰 것으로 판단된다.

측벽부의 수평응력은 굴진면이 측점을 통과하기 이전부터 통과후 까지 계속적으로 증가하다 하부반단면 굴착이 진행되면서 감소하는 경향을 보인다. 하부반단면 굴착이전까지는 링컷 굴착방법이 중벽분할굴착방법에 비하여 큰 수평응력이 작용하나 하부반단면 굴착이 후에는 오히려 수평응력이 더 작아졌다. 측벽을 보강한 경우 두 굴착방법 모두 응력증가량이 작게 나타났다.

연직응력은 굴착에 따라 계속 응력이 증가하는 양상

을 보인다. 3차굴착인 하부반단면 굴착이전까지는 측벽 보강효과가 거의 나타나지 않지만 3차굴착이 진행되면서 측벽보강이 이루어진 경우 연직응력의 증가량이 작아진다. 굴착방법에 따른 차이는 미소하며, 중벽분할굴착의 경우 연직응력은  $20\sim 30\text{kN/m}^2$  가량 작게 나타났다.

측벽의 종방향응력은 연직응력과 유사하게 굴착이 진행될수록 증가하는 경향을 보였다. 하부반단면을 굴착하는 3차굴착 이후부터 보강효과가 나타나 응력증가량이 감소하였다. 중벽분할굴착방법을 적용한 경우 3차 굴착 이전에는 링컷 굴착방법에 비하여 작은 종방향응력을 보이나, 3차굴착 이후에는 차이가 미소하였다.

전방코아부의 연직응력은 굴착이 진행될수록 터널 굴착방법과 상관없이 응력이 증가하였다. 중벽분할굴착의 경우 종방향 아칭영향으로 전방코어 굴착 이전까지 연직응력이 증가하였으며, 링컷굴착의 경우에는 1차 링컷 굴착면이 코어부를 통과하기 이전에는 종방향 아칭



의 영향을 받아 응력이 증가하지만 통과 이후에는 상부의 토압이 제거되므로 응력이 감소하였다.

굴진면 전방 코어부의 수평응력은 측벽보강 유무에 따라 차이가 거의 발생하지 않는 것으로 보아 굴진면 전방에는 측벽보강의 효과는 없는 것으로 판단된다.

중방향응력은 측벽보강에 의한 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 굴착방법에 따라 굴진면이 측점에 도달하는 순간의 응력변이 양상이 상이하였다. 중벽분할 굴착의 경우 코어의 굴착 직전에 응력이 증가하나 링컷 굴착의 경우 2차 벤치굴착으로 인하여 중방향 응력이 감소하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 대심도 풍화대에 시공되는 2차로 도로 터널을 기준으로 터널의 굴착방법과 지반보강그라우팅에 의한 지반변위 및 지중응력의 분석을 통하여 최적의 시공방안을 찾고자 하였다. 2차로 도로터널의 직경은 약 12m를 적용하였으며, 풍화대에 시공되는 터널의 기본적인 보강공법으로 터널천단부에 강관다단그라우팅을 적용하였다. 굴착방법은 1차굴착 : 링컷굴착, 2차굴착 : 벤치굴착, 3차굴착 : 하부반단면굴착으로 구분되는 링컷굴착방법과 1차굴착 : 좌측상부굴착, 2차굴착 : 우측상부굴착, 3차굴착 : 하부반단면 굴착으로 구분되는 중벽분할굴착방식으로 검토하였으며 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 터널 천단의 소성율과 연직응력비를 분석한 결과, 풍화대 지반에 굴착되는 터널에서 토피고(H)가 터널직경(D)의 4배 이상일 경우( $H > 4D$ ) 대심도 터널로 판단된다.
- (2) 중벽분할 굴착방법을 적용할 경우 링컷 굴착방법에 비하여 지표 침하는 13~17%, 천단 침하는 5% 가량 작게 나타났으나, 측벽 변위의 경우에는 약 3% 정도 크게 나타났다.
- (3) 천단부의 연직응력은 굴착방식에 따라 초기에 천단부의 굴착이 많이 진행되는 링컷 굴착의 경우 굴착 직후 응력 감소량이 크게 발생하였으나 최종 단계에서는 중벽분할 굴착방식과 큰 차이가 발생하지

않았다.

- (4) 측벽부의 수평응력은 하부반단면 굴착이전까지는 링컷 굴착방법이 중벽분할 굴착방법에 비하여 큰 수평응력이 작용하나 하부반단면 굴착이후에는 오히려 수평응력이 더 작아졌다.
- (5) 하부측벽보강을 실시할 경우 두가지 굴착방법 모두 천단침하는 약 3%, 지표침하는 약 4% 감소하였다. 측벽변위는 링컷 굴착방법의 경우 44%, 중벽분할 굴착방법에서는 22% 감소하여 측벽보강 효과가 가장 크게 나타났으며, 측벽 보강효과는 링컷 굴착방법이 중벽분할 굴착방법에 비하여 양호한 것으로 나타났다. 따라서, 하부보강을 실시하여 터널의 내공변위 및 침하 발생을 억제하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- (6) 상기의 해석결과를 정리하면, 상부 또는 측벽부 지반보강에 따른 지반변형은 감소하는 것으로 나타났으며 굴착방법에 대해서는 링컷 굴착방법보다는 중벽분할 굴착방법이 지반변형 및 지중응력 측면에서 유리한 것으로 나타났다.
- (7) 본 연구에서 토압계수로  $K=0.5$ 를 적용하였으나 토압계수의 차이에 따라 굴착방법에 따른 지반거동은 본 연구결과와 상이할 수 있으므로 향후 대심도 풍화대에 대한 토압계수의 재정립이 필요할 것으로 판단된다.

#### 참고 문헌

1. 남기천, 허영, 김치환, 유광호 (2002), "RPUM과 유리섬유 파이프 로 막장을 보강한 토사터널의 변형거동", 터널기술, *한국터널공학 회논문집*, 제4권, 제3호, pp.185-193.
2. 최용기 (2003), *굴진면 보강에 의한 토사터널의 중방향 아칭 효과*, 건국대학교 공학박사 학위논문, pp.5-35.
3. Broms, B. and Bennermark, H. (1967), *Stability of clay at vertical openings*, Swedish Geotechnical Institute Publication, No.16, pp.71-94.
4. Chambon, P. and Corté, J.F. (1990), "Stabilité du front de taille d'un tunnel dans un milieu frottant approche cinématique en calcul à la rupture", *Rev. Franc. Geotech.*, 55, pp.51-59.
5. Lo, K.Y., Ogawa, T., Sekiguchi, K. and Rowe, R.K. (1990), "Large deformation and face instability in tunnelling through thick fault zones", *Proceedings of International Conference Tunnelling in the 90's*, Vancouver, pp.101-120.
6. Peck, R.B., Henaron, A.J. and Mohrae, B. (1972), "State-of-the-art of soft ground tunnelling", *Proceedings 1972 RETC*, Vol.1, Chicago, pp.259-280.

(접수일자 2007. 1. 7, 심사완료일 2007. 8. 21)