

---

# 지하철 공사장의 붕괴사고와 NATM공법

## On The Falling accidents of the Subway Construction related to NATM

李 喜 根\*  
Lee, Hee Kun

---

### 1. 서 론

NATM공법이란 Austria의 학자 L.V. Rabcewicz에 의해서 아이디어가 제안되고 이론적 전개가 이루어진 New Austrian Tunneling Method의 두 문자를 따서 불려지게 된 신 오스트리아식 터널공법이다. 오스트리아를 위시해서 유럽의 알프스에 접한 국가들이 그들의 지형상 많은 터널을 필요로 하게 되었고 게다가 重壓개소의 터널공법이 요구됨에 따라 이에 대한 연구가 신중하게 진행되던 중, 1944년경에 L.V.Rabcewicz에 의해서 NATM공법의 이론적 연구가 태동되고 1964, 1965년에는 역시 그에 의해서 The New Austrian Tunneling Method란 논문이 Water Power지에 게재됨으로써 세인의 이목을 끌게 되었다. 이웃 일본에서는 신간선 터널공사에서 이미 이 공법에 의한 굴착을 시도하여 그 효과가 성공적이었음을 보였으며, 최근에는 우리 나라에서도 지하철 공사를 비롯하여 여러 건설회사에서의 지하공간 굴착공사에서 NATM공법을 적용하는 예가 많아졌다. 그러나 시행착오적 견지에서 사고도 없지 않았으니 이 시점에서 NATM공법의 이론을 재고찰해보는 것도 의의가 있다고 보겠다.

종래 터널공법의 지보개념은 발생하는 중압에 대해서 이를 지지할 수 있는 강도의 지보를 설계 및 시공하는데 주안점을 두었다. 그러나

지보에 작용하는 중압은 지질조건이나 암석의 물성에 의해서 결정될 뿐만 아니라 시공되는 지보의 물성에 의해서도 변화하는데, 이러한 지보의 특성은 지보재료의 강성, 강도를 비롯하여 지보의 형상, 설치시기, 암반과의 밀착정도 등에도 크게 영향을 받는다. 따라서 위의 상황들의 최적조건에 또한 현장계측을 토대로 하는 현장상황을 충분히 가미하여 종합적으로 합리적인 지보설계가 이루어지도록 해야할 것이다.

종래의 터널공법은 철재지보와 厚肉, 즉 콘크리트 라이닝(lining)을 주요한 지보요소로 하는데 반하여 NATM공법은 록볼트(rock bolt)와 薄肉, 즉 쏫크리트(shotcrete)를 주요한 지보요소로 하는 공법이다. 즉 NATM공법은 굴착 후 노출되는 암반을 가능한 한 빨리 록볼트 및 쏫크리트에 의해서 1차 라이닝을 실시함으로써 可縮可屈構造를 형성하여 암반이 본래가지는 지지력을 적극적으로 활용하는 공법이다. 또한 NATM공법은 건설현장에서 중압 및 변형을 측정하여 그의 시간적 변화를 측정해서 2차 라이닝의 시공시기를 결정하고 중압제어에 측정결과를 직접 이용할 수 있는 특성을 지닌 터널 공법이다. 위에 설명한 NATM공법을 다음에 비유해서 예를 들어 설명하기로 한다. 즉 어떤 사람으로 하여금 무거운 물건을 힘겹게 들도록 해 놓고, 충분한 지원병이라고 해서 늦게 보내면 이미 그 사람은 그 물건의 무게를 못 이겨 거꾸

---

\*서울대학교 工科大學教授

러지면서 물건은 깨지고 회생불능이 될 수도 있어서 결국 지원병의 효과도 발휘하지 못하게 될 것이다. 그러나 1차적인 지원병을 가능한한 빨리 보내면 먼저 들고 있는 사람의 여력에 지원병의 힘을 합쳐서 그 무거운 물건을 안전하게 들 수 있을 것이다. 그리고 상황을 보면서 적절한 2차적 지원병을 보내어 그 물건의 지지체계를 완결하자는 것이 NATM공법의 요체로서 특히 먼저 들고 있는 사람의 여력을 최대한으로 이용하자는 것이 위에서 말한 암반의 본래의 지지력을 적극적으로 활용하자는 개념이 되겠다.

## 2. NATM공법의 시공방법

NATM공법에서는 1차 및 2차 라이닝을 실시하는데, 먼저 1차 라이닝의 시공방법은 다음과 같다.

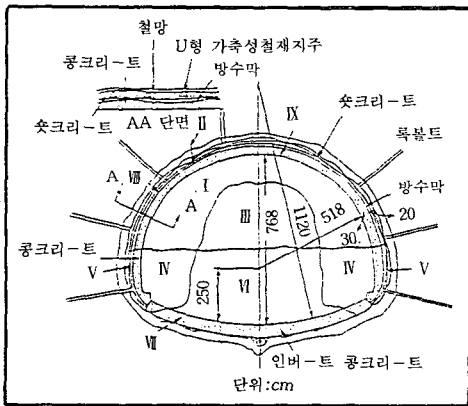


그림1 NATM공법의 시공 순서

Fig.1에서 보는 바와 같이 먼저 터널 천정부의 원호 부분을 암반의 상태에 따라 다르지만 약 1m의 굴착깊이로 굴착한다(I부분의 굴착, 시공 1단계:그림에서 I, II.....는 시공순서를 표시함). 이때 특히 연약암반 중에서는 반팽창 같은 암반변형을 억제하기 위하여 중심부의 암반을 다음 공정까지 남겨두는 일이 있다. 그리고 굴착한 토석을 제거한 후 즉시 U형 가축 철재지주를 설치한 다음 철망(wire mesh)을 굴착면에 덮어씌우고 록볼팅(rock bolting)을 실

시한다. 그 다음에 철망, 철재지주가 덮여질 정도로 shot크리트를 실시한다(시공 II단계). 여기서 shot크리트의 두께는 최대한 25cm이하로 얇게 실시하는 점, 상당한 두께의 shot크리트 시공이 필요할 때는 1회로써 완전히 시공하지 않고 수 회로 나누어 실시하는 점, 변형이 크게 일어나는 암반에서는 shot크리트를 전면에 걸쳐 실시하지 않고 좌우 어깨부분에 30~40cm의 공간을 남겨두는 점등은 라이닝에 적당한 가축가굴성을 보유시키기 위함이다. 다음은 중심부에 남겨둔 암반을 제거한다(시공 III단계). 그리고 측벽부를 굴착하고(시공 IV단계), 용접된 철재지주와 철망으로 보강된 shot크리트를 실시한다(시공 V단계) 다음에 벤치(bench)를 굴착하고(시공 VI단계), 인버트(invert)의 콘크리트를 실시한다(시공 VII단계). 이렇게해서 1차 라이닝을 완성시킨다. 단, 단면이 크고 중압이 크게 작용하는 암반의 경우에는 벤치를 2~3단으로 나누어 같은 방법으로 시공하기도 한다.

일반적으로 I 단계부터 V 단계까지의 작업은 매일 반복 진행되며, VI 단계와 VII 단계는 주1회 정도 실시한다. 굴착 면으로 부터 인버트 시공 위치와 시간간격은 암반조건에 따라 다르지만 일반적으로 굴착면으로부터 약 20m의 간격을 두고 뒤따라가면서 인버트를 시공하며, 시간 간격은 굴착후 보통 15~20일이 지난 후가 된다.

2차 라이닝은 일반적으로 굴착면의 후방 100~500m의 거리에서 실시하게 된다. 먼저 쿠션(cushion)을 겸한 방수막을 1차 라이닝 벽에 깔아덮고(시공 VIII단계), 그 위에 콘크리트 라이닝을 전면에 걸쳐 실시한다(시공 IX단계). 시공 VII 단계와 IX 단계의 시간간격은 역시 암반조건에 따라 다르지만 일반적으로 3~5개월이 소요된다. 이것은 1차 라이닝에 의하여 암반의 변형과 중압의 관계가 안정될 때를 기다리기 위함이다.

암반의 변형 및 중압의 시간적 변화는 터널 진행에 따라서 50~100m 마다 측정 단면을 설정하여 암반변위계(convergence meter) 및 shot크리트의 법선 및 접선방향 응력계 등에 의해서 측정한다.

인버트를 시공함으로써 1차라이닝이 완성되어 노출암반이 완전 회복된 구조로 되면 일반적으로 암반변형은 거의 정지되는 것을 현장에서 확인할 수 있다. 따라서 2차 라이닝은 안전 및 구조상의 이유와 방수를 위하여 시공하게 된다.

### 3. 터널주위의 암반거동 및 암석역학에 근거한 중압조절 방법

상술한 바와 같이 NATM공법은 한편으로는 굴착후 즉시 라이닝을 실시하여 초기변형을 적게 하며, 다른 한편으로는 가축가굴구조로 하여 무리하게 변형을 구속하지 않도록 한다. 즉 변형을 적게하도록 노력하면서 또 한편으로는 어느정도 변형을 허용하도록 노력한다. 다시말하면 변형을 허용하지 않으려는 강직성의 대처보다는 적당히 허용하면서 유연성있게 탄력적으로 대처하자는 것이다. 그리고 1차 라이닝은 가능한 한 빨리 시공하는 한편 2차라이닝은 충분한 시간을 두고 시공하는 점도 위의 변형조절방법과 마찬가지로 얼핏보면 서로 상반되는 일을 하고 있지 않는가 하는 의문이 생기게 된다. 이 의문에 답하기 위해서는 아무래도 암석역학적 검토가 필요하게 된다.

터널을 굴착하면 공동주위의 암반에는 응력집중현상이 일어난다. 이 집중응력은 때때로 암석강도를 초과하게 되어 소성영역으로 진입하게 됨으로써 암반은 이미 탄성거동을 벗어나 예를 들면 탄소성 거동을 하게 되는 것이다. 이와같은 암반의 거동은 응력-변형률 관계에 의해서 설명할 수 있다.

그림 2는 강성압축시험기에 의한 단축압축시험의 결과를 모식적으로 표시한 것이다. 종래의 연성 압축시험기에 의하면 압축강도 지점에서 시험편은 파괴되고 말았지만 강성압축시험에 의하면 암석강도 즉 최대 하중점을 지난후에도 암석의 하중저항력이 감소하면서 변형이 증가하는 과정 즉 변형연화(strain softening)과정을 얻을 수 있게 되었다. 이 과정의 최후 단계로 殘留強度(residual strength)에 이르게 된다.

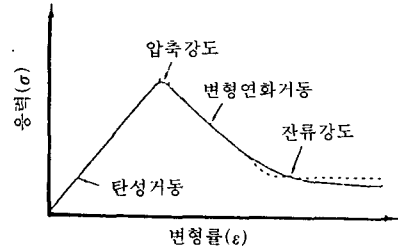


그림2 단축압축 시험하에서의 응력-변형률 관계의 모식도

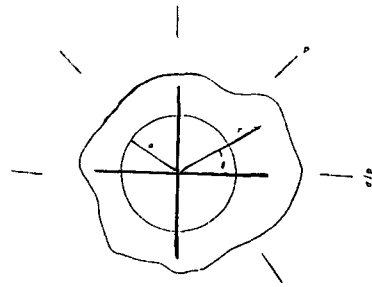


그림3 정수압 상태하의 탄소성체내 원형터널

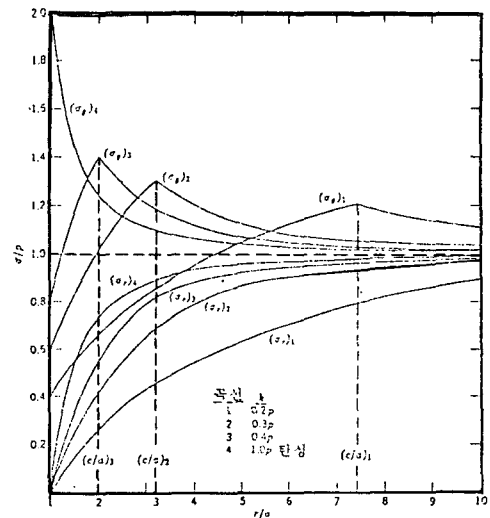


그림4 탄소성체내 원형터널 주위의 응력 분배도 (참조 : L.Obert & W.I.Duvall)

예를들면 정수압 상태하에 있는 암반중에 원

형 공동을 굴착했을 경우, 발파 등으로 인해서 공동주위에 소성영역이 발생하여 이완대가 생겼다면 그림3과 같은 탄소성체 암반을 생각할 수 있다. 이때 그림 2와 같은 암반거동을 고려하여 공동주위의 암반거동에 대해서 탄소성해석을 실시한 결과의 한 예를 그림 4에 표시하였다.

암반의 파괴가 시작되는 최대 전단응력(K)을 재하응력(p)의 분수로 표시하여  $K=hp$ 로 나타냈을 경우, 그림 4에서 곡선 1은 공동벽면에서 암반이 소성영역으로 들어가기 시작하는 경우로서 결국 벽면에서 응력집중이 최대가 되는 탄성해가 되는 것이다. 곡선 2~4는 파괴가 시작되는 최대전단응력치가 각각  $0.4p \sim 0.2p$ 로 더 작은 경우로서 이미 공동주위에는 소성영역이 점점 더 넓게 발전되어 있음을 알 수 있다. 즉 탄소성영역의 경계(공동중심으로부터의 거리가 C인 경계)가 점점 암반 내부쪽으로 들어가면서 벽면에서의 접선응력은 작아지고 있음을 알 수 있다.

위에서는 무지보 공동에서 재하압력이 변화하는 경우에 대해서 설명했는데, 다음에는 재하압력이 일정할 때 라이닝의 시공시기, 강성도 등이 벽면의 거동에 미치는 영향을 알아보기로 한다. 이때 라이닝에는 터널벽면의 외향변위로 인하여 수동압, 즉 중압  $P_i$ 가 작용함과 동시에 라이닝은 터널벽면의 외향변위  $U_a$ 를 구속하게 된다 라이닝 구축시기가 같은 경우라면 라이닝의 강성이 클수록 중압  $P_i$ 는 증가한다. 그리고  $P_i$ 는 공동벽면의 반경방향응력  $\sigma_{ra}$ 와 같게 된다는 것은 당연한 사실이다. 이때  $\sigma_{ra}$ 와  $U_a$ 사이에는 암반의 응력-변형률 관계에 의해서 이루어지는 일정한 관계가 유지되지만, 이 상태는  $P_i$ 에 의해서 영향을 받는다는 사실에 주의할 필요가 있다. 즉 라이닝의 강성에 의해서 암반벽면의 연화현상 발전정도가 달라진다는 것이다.

$\sigma_{ra}$ 의 대소 두 경우의 공동 주위 암반응력과 암반의 외향변위와의 관계를 모식적으로 표시하면 그림 5와 같다. 이 그림은 강성이 높은 라이닝과 낮은 라이닝이 동일시기에 시공되었을 때의 응력 및 변형상태를 각각 실선과 점선에 의해서 표시한 것으로 생각할 수 있다. 여기서 볼 수 있는 바와 같이 후자는 전자에 비하여 벽

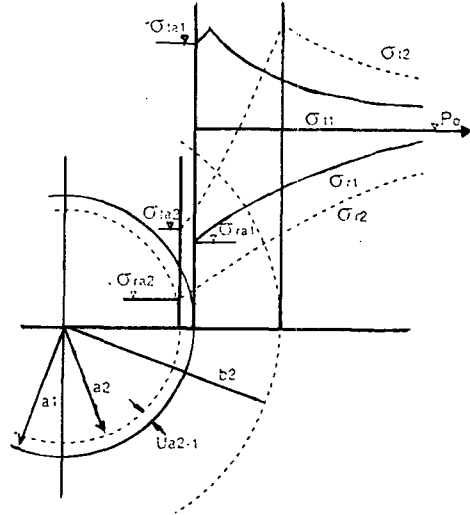


그림5 강성 및 연성 라이닝에 의한 공동 주위의 변형과 응력 분배도

면의 외향변위량은 크지만 라이닝에 작용하는 중압은 적게 나타나고 있음을 알 수 있다.

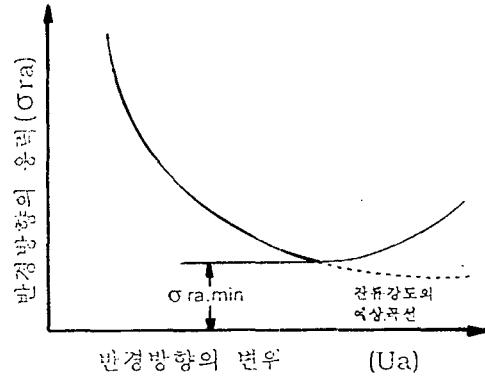


그림6 라이닝 실시 후, 공동 주벽에서의 반경방향 응력-변형 곡선

평형을 이루고 있을때의  $\sigma_{ra}$ 와  $U_a$ 의 관계를 모식적으로 표현하면 그림6과 같다. 여기서 공동벽면의 외향변위  $U_a$ 를 거의 일어나지 못하도록 라이닝에 의해서 구속한다면, 이때 발생하는  $\sigma_{ra}$ 는 대단히 크게 나타나겠지만 적당히 허용해 준다면,  $U_a$ 는 급격히 감소함을 알 수 있다. 그리고  $U_a$ 의 어느 일정치에서  $\sigma_{ra}$ 는 최소치가 된다는 것이다. 다시 말하면  $U_a$ 가 어느 일정치를 지나게 되면 중압  $P_i$ 는 다시 증가하는 경향으로 전환한다는 것을 알 수 있다. 이 이유로는 공동주위의 암반이 잔류강도의 영역에 들어가면 암반

의 하중저항력이 매우 저하되어서 자중마저 지 지할 수 없는 상태로 되어 결국 암반은 死荷重 으로서 라이닝에 작용한다는 사실, 그리고 변형 이 매우 일어나기 쉬운 상태에 있기 때문에 유 동압 또는 팽창압이 작용한다는 사실등을 알 수 있다. 결국 터널주의의 암반에 발생하는 응력과 변형은 초기암 반응력, 암반의 응력-변형률관 계, 라이닝의 종류에 따른 강성 및 그 구축시기 등에 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 이들 관 계를 그림으로 나타낸 것이 그림7이다.

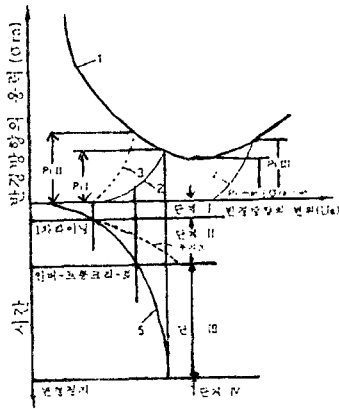


그림7의 곡선1은 그림6의 응력-변위곡선을 나타내며, 곡선2는 라이닝을 구축한 후, 라이닝의 중압  $P_i$ 와 변위  $U_a$ 와의 관계를 나타낸 것으로 터널굴착 후 즉시 라이닝을 실시하면 초기의  $U_a$ 는 작으며,  $U_a$ 의 증가에 따라  $P_i$ 도 증가하여 곡선1과의 교점에서 응력의 평형상태에 도달하게 된다. 이때의 중압을  $P_{iI}$ 이라고 한다. 한편 같은 시기에 보다 강성이 높은 라이닝을 구축하였다고 하면 곡선 3과 같이 급격히 증가하므로 평형중압  $P_{iI}$ 는  $P_{iII}$ 에 비하여 보다 크게 나타난다. 따라서 NATM공법에서는 1차 라이닝은 굴착후 가능한 한 빨리 그리고 薄肉의 슛크리트 라이닝으로서 가축가굴구조로 하는 것은 위와 같은 이유에서이다. 이에 대하여 종래의 공법에서는 즉시적인 1차 라이닝을 실시하지 않고, 슛크리트에 비하여 지보의 밀착성도 나쁘기 때문에 중압개소에서  $U_a$ 는 크게 증가해서 곡선4와 같이 거동하게 된다.

즉  $\sigma_{ra}$ 의 최소치보다 우측에서 곡선1과 교차하여 응력평형을 이루어 중압  $P_{iIII}$ 을 받게 된다.

이 경우 지보가 국부적으로 파괴되었다면 변형은 증가하므로  $P_i$ 는 증대하여 그 보수는 더욱 곤란하게 된다. 이에 비하여 NATM공법은 국부적으로 파괴되어도  $\sigma_{ra}$ 가  $U_a$ 의 증가에 따라 감소함으로써 그 보수는 용이할 것으로 생각된다. 곡선5는 암반의 응력 재분배와 라이닝간의 상호작용에 의하여 4단계의 특징을 나타내는 곡선이다.

단계 I은 굴착후로부터 1차 라이닝의 실시 이전까지의 구축되지 않은 시기로서 암반의 외향변형이 자유롭게 일어나는 시기이다. 이 초기 변형은 초기암반응력, 암반의 성질, 무지보기간 등에 의하여 영향을 받는다. 1차 라이닝을 실시하면 변형의 증가속도는 단계 II에 표시한 바와 같이 감소한다. 이때 라이닝의 반력은 그의 강성에 관계되고 이 강성은 라이닝의 재료에 의해서 변화할 뿐만 아니라 그의 기하학적 형상에도 관계된다. 즉 인버트의 시공에 의해서 閉塞形구조로 되면 강성은 증대하여 단계 III과 같이 변형 증가속도는 더욱 감소하며, 최후로  $P_i$ 가  $\sigma_{ra}$ 에 같아질 때 응력평형을 이루어 단계 IV와 같이 변형은 정지 상태에 이르게 되는 것이다.

#### 4. 결 론

NATM공법의 시공방법을 설명하고 암석역학적으로 고찰해보았는데 중요한 점들을 요약하면 다음과 같다.

- 1) NATM공법은 1차 및 2차 라이닝을 실시하는데, 1차 라이닝은 굴착후 가능한 한 빨리 록볼트, 철망, 슛크리트 등에 의해서 可縮可屈構造로 구축하여 암반의 변형을 무리하게 구속하지 않도록 하고, 2차 라이닝은 충분한 시간을 두어 변형이 안정되며 정지상태에 이를 때 실시함으로써 콘크리트 라이닝을 완성시킨다.
- 2) 슛크리트는 암반과의 좋은 밀착성을 가지고 있기 때문에 이를 이용하여 암반이 가지고 있는 본래의 지지력을 최대한으로 이용할 수 있다.
- 3) 공사 진행중에 중압, 변형 및 이들의 시간적 특성을 현장에서 측정하여 그 현장조건에 알맞는 시공자료로 직접 이용할 수 있다.
- 4) 암반역할적 이론에 근거하여 지압제어를 할 수 있다.