

철도 터널의 싱글셸 지보시스템 적용에 관한 기초 연구

A Basic Study for Single Shell Support System of Railway Tunnel

정 대 호[†] · 정 찬 목¹⁾

Daeho Jung · Cahnmook Jeong

Received: November 19th, 2015; Revised: November 26th, 2015; Accepted: December 17th, 2015

ABSTRACT : In this study, it can be shortened tunnel construction work period by introducing a single-shell tunnel does not placing the secondary concrete lining, a global research trend, reduction of the cost of the lining placement and number of benefits that can ensure the safety of long-term tunnel with a single shell it was to study the tunnel method. First, we analyze the design and construction practices relating to delete lining of the domestic design and construction practices and a comprehensive analysis of the stability study found a rock in good condition interval (1~3 grades), we propose that the lining uninstalled. In the case of domestic changes on the ground floor is very heavy underfoot conditions many so tunneling method by single shell as ground conditions are good and one preferred the water points that apply in less soil, the soil health and poor sections (4~5 grades) reflecting with respect to the concrete lining that is expected reasonable.

Keywords : Single shell, Railway tunnel, Support system, Concrete lining

요 지 : 본 연구에서는 세계적인 연구 추세인 2차 콘크리트 라이닝을 타설하지 않는 싱글셸 터널을 도입함으로써 터널 시공 공기를 단축할 수 있으며, 라이닝 타설에 따른 공사비의 절감과 장기적인 터널의 안전성을 확보할 수 있는 다양한 장점을 지닌 싱글셸 터널 공법에 대하여 연구하고자 하였다. 먼저 국내의 라이닝 삭제와 관련된 설계 및 시공 사례를 분석하였으며, 설계 및 시공 사례와 안정성 검토 결과를 종합적으로 분석한 결과 암반상태가 양호한 구간(1~3등급)에서는 라이닝을 미설치하는 것으로 제안하였다. 국내의 경우 지층의 변화가 매우 심한 지반조건이 많으므로 싱글셸에 의한 터널링 방법은 가능한 지반조건이 양호하고 용수개소가 적은 지반에서 적용하는 것이 바람직 하나, 일반적인 터널 구조물의 후보지의 경우에는 여러 가지 암종 및 암반상태가 교차하여 장기적으로 안정성 확보가 곤란한 경우에는 싱글셸보다는 철근콘크리트 개념을 적용한 NATM 방법이 합리적인 것으로 판단된다. 즉 지반조건이 불량한 구간(4~5등급)에 대하여는 콘크리트 라이닝을 반영하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 최근의 설계기준 개정 방향과 세계적으로 라이닝 삭제에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는 상황이므로 시공성 및 경제성 개선 등을 고려한 라이닝 삭제 방안이 점차 대두되고 있으므로 합리적이고 공학적인 설계 기준을 구축하기 위한 지속적인 연구가 이루어져 할 것으로 판단된다.

주요어 : 싱글셸, 철도 터널, 지보시스템, 콘크리트 라이닝

1. 서 론

산업발달과 함께 도시의 팽창과 기하급수적으로 늘어나는 인구와 교통·통신수단의 증가에 의한 생활공간의 부족은 지상에서의 토지이용률 증가에도 불구하고 더욱 심화되어 가고 있기 때문에 지하공간을 이용하는 대안은 필수불가결하게 되었다. 이에 대한 대안으로 도심지 지하철과 고속철도, 각종 도로 터널 등과 같은 많은 터널과 지하 구조물의 건설이 이루어지고 있다. 우리나라는 1980년대 이후 서울 지하철 1호선 건설을 시작으로 본격적인 도시 인프라 건설이 시작되었으며, 국내 지하철 건설에 NATM 터널 개념을 도입시작으로 국내의 모든 터널 건설에 새로운 개념이자 공

법인 NATM 터널이 도입되기 시작하였다. NATM 터널은 지반 자체의 지지능력을 최대한 활용하고자 하는 것이 기본 개념이며, 주지보재로는 1차 지보재로 슛크리트와 록 볼트를 활용하며 1차 지보재와 2차 지보재 사이에 방수막을 설치하고 추가로 2차 지보재로 라이닝을 타설하는 2중의 분리된 구조이며 현재까지 대부분의 터널에 적용되고 있는 실정이다. 그러나 최근 들어 국내 도입 후 30년이 지난 현재의 시점에서 지보재의 열화 및 노후화에 대한 우려와 NATM의 효율성에 대한 논의가 이루어지기 시작하고 있다(Yang, 2010). 국외 선진국의 경우에 NATM의 개념에 대한 오류들이 지적되고 있으며(Kovari, 1995), 이러한 오류로 인한 여러 사고사례들이 보고되고 있다(Kirland, 1996; Anderson,

† Korea Rail Network Authority (Corresponding Author : jdh6311@kr.or.kr)

1) Department of Railroad Civil System Engineering, Woosong University

1997). 국내의 터널 붕락 사례를 분석한 결과(Shin, 2001), RQD가 모두 50 이하이며 대부분 4~5등급에 속하는 것으로 나타나 연약지반에 대처할 수 있는 지반조사가 충분히 이루어지지 않은 것으로 추정된다.

이러한 문제점들을 해결하고자 국외에서는 기존 NATM 공법에서 일반적으로 적용되고 있는 2차 라이닝을 생략하고 주변 지반과 일체화된 거동이 가능하도록 주변 지반 자체의 지보기능을 유용하게 활용할 수 있는 싱글셸 공법을 체계화하기 위한 연구들이 이루어지고 있는 실정이다(Barton, 1995; Broch, 2001). 이러한 싱글셸 터널 공법의 주된 개념은 1차 지보재들의 성능을 향상시켜 2차 지보재를 생략 또는 간략화하여 NATM의 문제점을 보완 극복하고 보다 합리적인 터널을 시공하는 것이다.

본 연구에서는 세계적인 연구 추세인 2차 콘크리트 라이닝을 타설을 생략하는 싱글셸 터널을 도입함으로써 터널 시공 공기를 단축할 수 있으며, 라이닝 타설에 따른 공사비의 절감과 장기적인 터널의 안전성을 확보할 수 있는 다양한 장점을 지닌 싱글셸 터널 공법에 대하여 연구하고자 하였다. 본 연구에서는 철도 터널 건설을 위하여 세계적인 터널 기술 선진국들에서 도입되고 있는 싱글셸 터널 공법에 대하여 국내의 실정에 맞는 싱글셸 터널 공법에 대하여 국내 실정에 맞는 싱글셸 터널 공법을 제안하고자 한다. 국내 대부분의 터널에 적용되어 있는 NATM 터널은 지반 조건과 관계없이 라이닝을 타설하고 있는 실정이고 이로 인하여 과도한 공사비 책정의 원인이 되고 있으며, 라이닝 타설로 인한 공사기간이 추가로 소요되고 있는 상황이다(Lee et al., 2001). 국외의 경우 노르웨이, 독일, 일본 등에서 싱글셸 터널과 관련된 많은 연구들이 이루어졌으며 국내의 경우 최근 들어 싱글셸 터널과 관련된 고강도 고내구성 슛크리트와 록 볼트에 대한 연구(Korea Institute of Construction Technology, 2006; Bae et al., 2006)가 수행되기 시작하고 있다. 따라서 합리적인 철도 터널 건설을 위하여 공사비 및 공기절감 효과를 기대할 수 있으며 구조적 안정성, 지보재의 장기 내구성을 확보할 수 있는 싱글셸 터널에 대한 연구가 필요한 실정이다. 국내의 경우 최근 들어 싱글셸 터널에 대한 연구들이 시작되었으며, 철도 터널 관련 설계 기준들에 개정되며 지반조건을 고려한 경사 터널의 라이닝 삭제에 대한 개정 이후 경사 터널에 설계 및 시공이 적용되기 시작하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 먼저 국내 싱글셸 터널의 공법 개발을 위하여 1차 지보재와 관련된 기본 메카니즘을 분석하고 싱글셸 공법이 적용된 현장사례 분석과 싱글셸 터널의 거동에 대한 장기적인 안정성을 검토하고 그에 대한 고찰을 하고자 한다.

2. 이론적 배경 및 싱글셸 NATM 터널 공법 개념

2.1 NATM(New Austrian Tunnelling Method) 터널의 기본 원리

1980년대 지하철 건설을 계기로 국내에 소개되기 시작한 터널 공법인 NATM 터널 공법은 터널의 시공법이라고 하는 것 보다는 터널 시공을 위한 개념으로 출발하였다. 1978년 오스트리아의 Miller 박사가 소개한 Fundamental Ideas and Principles of the "New Austrian Tunnelling Method"라는 강연에서 이론적으로 정립되고 소개되었다. NATM의 기본적인 개념에서 터널은 주변 암반과 지보공이 일체화된 구조물이 되었을 때 가장 안전하고, 터널을 지보하는 것은 기본적으로 주변 암반이며 암반은 그 스스로를 지지할 수 있는 자주적인 지보 능력을 가진다. 그러므로 암반이 원래 가지는 강도를 될 수 있으면 손상하지 않도록 해야 하며 그러기 위해서는 굴착 후 최대한 빠른 시간 내에 굴착 면의 이완을 방지하기 위하여 슛크리트를 타설하여 원래의 자주적 지보 능력을 잃지 않도록 해야 한다고 정의하였다.

암반을 1차 지보재로 활용하고 가축성의 지보재를 타설하여 터널 주변의 외력과 지보재의 저항력이 평형을 이루도록 하는 NATM의 설계개념에 따라 지반의 변형 거동은 지보재 타설 이후에도 지속적인 소성변형에 의해 지보를 받아 지보재의 기능을 충분히 발휘하지 못하는 것으로 예상된다. 이와 같은 현상은 암반과 지보재의 상호개념을 잘 표현하고 있는 지반반응곡선(Ground Reaction Curve, GRC)을 통해 알 수 있다. 지반반응곡선은 터널 굴착 시 지압 암반 변위를 통해 지보 설치시기와 방법을 나타내며 Fig. 1과 같다.

암반 내에 터널 굴착 시 원지반이 가지는 지보압이 감소하게 되며 이에 따라 변위가 증가하기 시작한다. 주지보재인 슛크리트와 록 볼트 설치 이후 변위는 일정한 값에서 멈추게 된다. 지보재 설치시기는 빠른 시간 내에 설치될수록 암반 자체의 지지력을 최대한 활용할 수 있어 터널의 안정성 측면에서는 유리하나, 주변 지반의 거동을 고려하여 너무 빠른 시간에 설치하게 되면 지지해야 할 하중의 크기가 커서 지보의 지지용량이 커져야 하므로 비경제적이다. 따라서 적정 시간이 지난 후 어느 정도의 변형을 허용한 후 설치함으로써 작용하중의 완화를 유도하고, 암반의 변형이 과도하여 사하중의 크기가 증가하기 시작하기 전의 시점을 선택하는 것이 효율적이다. 동일한 시기에 지보를 설치하더라도 지보의 강성 차이에 따라 작용하는 하중의 크기가 달라지기 때문에 적절한 강성을 가지는 재료를 이용하여 변형을 제어하여야 한다. 따라서 강성에 따라 지지해야 할 하중의 크

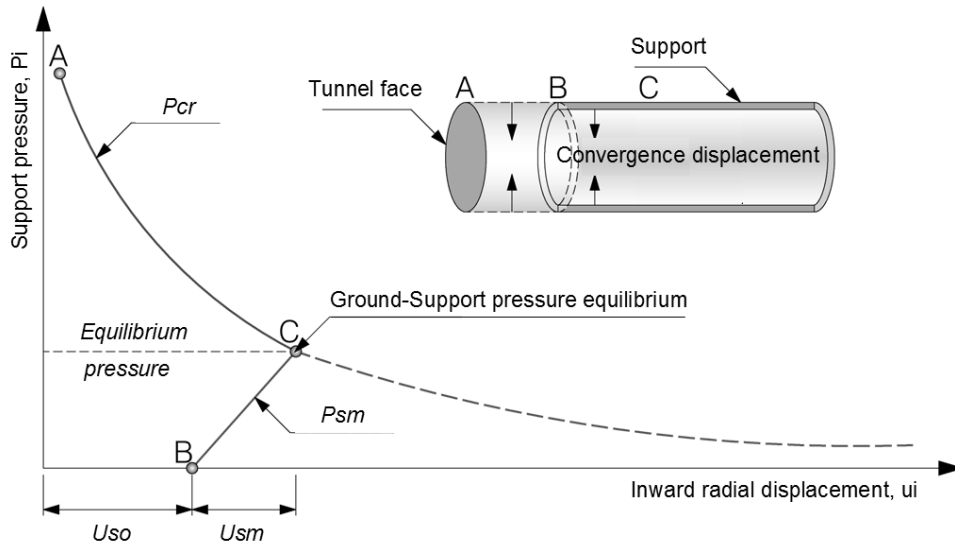


Fig. 1. Ground reaction curve

기가 달라지므로 적절한 강성을 지닌 지보를 설치하는 것이 유리하며, 너무 큰 강성의 지보는 재료의 강도를 높여야 하므로 비경제적이고 낮은 강성의 지보는 변형을 억제하지 못하고 지보의 역할을 하지 못하므로 적절한 강성을 지닌 지보를 선택하여야 한다. 만약 적절한 시기에 지보재가 설치되지 않는다면 암반의 변위는 지속적으로 증가하여 과다변위로 인한 붕괴가 발생하게 되므로 적절한 지보의 설치가 매우 중요하다. 이상과 같이 지보의 강성과 설치시기를 적절히 조절함으로써 암반이 지니고 있는 자주적 지지력을 활용하는 지보를 능동적 지보라 하며 NATM의 기본 정의이다.

2.2 Creep 이론

지하 구조물은 거의 일정한 지압을 받고 있으며 응력의 증가 없이 시간의 경과와 함께 변형률이 증가하는 Creep 현상 구조물의 장기 안정성 평가에 있어 매우 중요하다. 재료에 일정한 하중을 준 채로 방치하면 점점 늘어나는 성질이 있는데 일정 응력 하에서 재료가 점차적으로 변형하는 현상을 Creep이라 하고, Max-well 이론에 의한 일정 응력을 장시간 지속해서 작용시키면 시간 의존적인 소성변형을 말하며 매질의 체적변화현상이다. 터널이 굴착되는 암석 및 암반의 변형현상은 일반 재료와 달리 온도, 압력, 시간 등의 조건에 따라 비탄성적인 성질을 가지며 지하 구조물은 Creep 현상이 발생할 수 있다. 일반적으로 Creep 변형을 검토하기 위하여 탄성, 소성의 역학적 모델로 표현하며 3요소 모델 또는 5요소 모델을 이용하여 구현하고 있다.

탄성체에서 발생하는 변형률 또는 변형은 응력에 의해 결정되며 응력이 일정하면 변형률도 일정한 값을 갖는다. 암석을 포함하여 많은 재료에서 응력이 일정하게 유지된다 하여

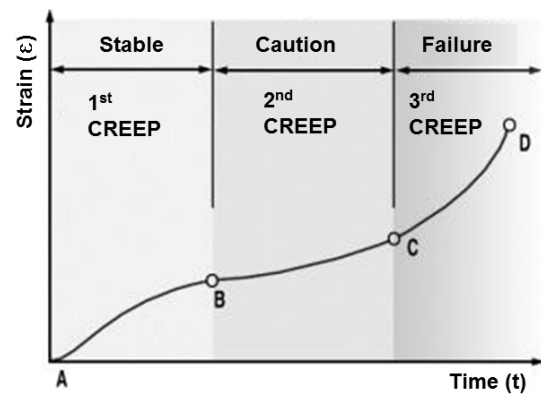


Fig. 2. Diagram of time - strain curve

도 변형률이 시간과 함께 변하는 시간 의존성 현상이 발생하는데 지중 구조물의 경우 일정한 지압을 받고 있기 때문에 터널의 장기적인 안정성을 논의할 경우에는 Creep 현상의 해석이 매우 중요한 사항이다.

일반적인 Creep 거동의 경우 변형률과 시간과의 관계는 응력이 일정 수준 이상이 되면 Fig. 2와 같이 된다. 암석에 하중이 가해지면 순간적으로 ϵ 인 변형률이 발생하며(순간 변형률) 작용하는 하중이 일정하게 유지되면 변형은 시간과 함께 증대해가며 Creep 곡선의 상태는 3단계로 구분 지어 설명되어진다. Creep의 3단계는 먼저 변형률 속도가 감소하는 1차 Creep(천이 Creep), 다음 단계는 변형률의 속도가 일정하게 유지되는 2차 Creep(정상 Creep), 그리고 마지막으로 변형률의 속도가 증가하는 3차 Creep(가속 Creep)으로 구분할 수 있다. 3차 Creep의 경우 응력의 크기에 따라 발생하지 않을 수도 있으며 발생할 경우에는 급격한 파괴양상을 보이기 때문에 정밀한 측정은 곤란한 것으로 알려져 있다. Fig. 2는 변형률-시간 곡선을 나타낸 것이다.

암석과 같이 복잡한 변형 성상을 나타내는 연구 분야인 유동학(Rheology)에서는 완전한 탄성체, 소성체, 점성체를 각각 Hooke의 고체(Hookean Solid, H), St. Venant의 고체(St. Venant Solid, SV), Newton의 액체(Newtonian Liquid, N)라 하며 다음과 같은 스프링(Spring), 마찰판(Slider) 또는 래칫 모델(Ratchet), Dashpot로 표현한다. 암반의 Creep 거동을 모사하기 위해서는 탄성체인 Spring 요소와 점성체인 Dashpot 요소체, 소성을 나타내는 Slider 요소체를 적절히 결합하는 것이 필요하며 Spring과 Dashpot를 직렬로 연결한 Maxwell 모형은 수차적인 탄성 변형률과 2차 크리프를 적절히 모사할 수 있으나 지수적으로 감소하는 1차 크리프를 설명할 수 없는 단점이 있고, Spring과 Dashpot를 병렬로 연결한 Kelvinah 형은 지수적으로 감소하는 1차 크리프와 선형적인 2차 크리프는 잘 모사하지만, 순간적인 탄성 변형률을 고려할 수 없으므로 이러한 단점을 보완하기 위해 Maxwell 모델과 Kelvin 모델을 직렬로 연결한 Burger's 모델을 사용하고 있다. Burger's 모델의 점·탄성 변수들은 실내 삼축시험을 통해 획득할 수 있으며, 이 과정에서 암반의 Creep 변형 특성과의 상사(Scale) 문제가 발생하는 것으로 알려져 있으나 Yu et al. (2000)의 실내 시험결과와 암반의 계측자료를 분석한 연구에 의하면 Creep 변형을 Stree-Strength Ratio로 평가할 경우 연속체로 간주할 수 있는 암반(Soft rock)이나 심하게 파쇄된 암반에 대해서는 상사 문제가 거의 발생하지 않는다고 결론 내리고 있다. 본 연구에서 Creep 해석에 적용한 물성은 현장적용 인근 퇴적암 지역인 00-00도로 건설공사 퇴적암 구간의 Creep 물성을 참고하여 암반별 평균값을 적용하였으며, Table 1에 나타나 있다.

2.3 Single Shell-NATM 터널의 개념

싱글셸은 NATM과 같이 숏크리트 및 록 볼트 등을 주요한 지보부재로 하지만 부재의 고품질화를 도모함으로써, 이들 지보부재를 영구 구조물로서 NATM에서 행하는 2차 복공인 콘크리트 라이닝 타설은 생략한다. 여기서 복공은 도로, 철도 및 수로 등의 사용 목적에 적합하고 장기간에 걸쳐 토압 등의 작용하중에 견디며 균열, 변형, 붕괴 등을 일으키지 않고 누수 등에 의한 침식이나 강도의 감소 등이 적으며 내구성이 있는 것으로 정의할 수 있다.

싱글셸의 경우 2차 복공인 콘크리트 라이닝이 생략되어 있으므로 지지보재인 숏크리트 및 록 볼트의 고품질화를 요구한다. 숏크리트는 리바운드량이 적은 고강도의 강섬유 보강 콘크리트, 록 볼트는 내부식성 록 볼트 등을 채택하고 시공에 있어서는 요구되는 품질을 만족하도록 관리하고 있다. 싱글셸의 록 볼트는 장기 내구성이 요구되는 것으로 수지 Bolt나 내부식성 록 볼트의 사용을 원칙으로 한다. 또한 싱글셸의 숏크리트는 지보와 복공의 기능을 갖게 할 필요가 있다. 굴착 직후에 시공하는 숏크리트는 변형이 큰 경우 일부에서 균열이 발생할 수 있으며, 이러한 경우 터널이 안정되어 있으면 지보로서는 문제가 없지만 복공으로 이용되는 경우에는 기능상의 문제가 있다. 균열이 있는 무한의 얇은 구조부재는 취성파괴를 일으킬 가능성이 있어 부재 내력의 저하는 피할 수 없다. 또한 누수 등에 의한 내구성의 문제가 있다. 그러므로 숏크리트를 구조부재로 사용하기 위해서는 강섬유보강 숏크리트를 사용하여 Toughness 특성의 향상을 도모하고 균열 발생 후에도 내력이 유지 되도록 할 필요가 있다. 고강도의 숏크리트를 사용하는 경우 부재 내력이 향상되고 그 결과 숏크리트 두께를 경감 할 수 있는 이점이 있으며, 리바운드량의 감소를 통해 시공성이 향상되고 숏크리트의 품질관리 및 경제성이 향상된다. NATM에서 시공되는 2차 복공의 대부분은 무근 콘크리트로 시공되고 있다. 이것은 복공의 역학적 기능을 고려하지 않고 사용성을 목적으로 설계되고 있어서이다. 통상 기준설계 두께를 정하고 있으며 일반적인 철도 터널에서는 30cm의 복공 두께가 채택되고 있다. 현재 NATM으로 시공되는 대부분의 터널에 있어서 지질 불량 개소의 터널을 제외하고 소정의 품질이 확보될 수 있는 복공에는 문제가 생기지 않는다. 그러므로 터널 복공의 기능 내구성은 확보되어 있다고 판단된다. 싱글셸은 해외에서는 많은 실적이 있고 일반적으로 인지되어 있는 공법이다. 그러나 국내에 있어서는 알려지지 않은 공법이며 싱글셸 도입에 있어서는 복공의 기능, 내구성을 확인할 필요가 있다. 그 판단 기준으로서 싱글셸이 NATM의 2차 복공과 동등 이상의 기능, 내구성을 가지고 있다는 것을 확인하는 방법이 있다. NATM에 있어서의 무근 콘크리트로 시공된 2차 복공의 정량적인 평가는 아직 정해진 것이 없다. Table 2는 각각의 복공의 설계시공 조건을 나타내고, Fig. 3은 싱

Table 1. Construction condition of NATM and single shell

Item	γ_t (kN/m ³)	M_k (MPa)	M_k1 (MPa)	m_vis1	M_k2 (MPa)	m_vis2
Weathered soil	20	39.22	8.24E+06	1.02E+09	1.91E+05	5.49E+09
Weathered rock	20	375.00	1.26E+07	1.53E+09	2.93E+05	8.24E+09
Soft rock	23	694.44	2.17E+07	2.55E+09	5.03E+05	1.37E+10
Hard rock	26	6172.84	1.48E+08	1.70E+10	3.43E+06	9.15E+10

Table 2. Construction condition of NATM and single shell

Item	NATM	Single shell
Construction method	Cast in-site	Spray works
Material	Plain concrete	Steel fiber reinforced shotcrete
Design strength (N/mm ²)	18	36
Lining thickness	30	20

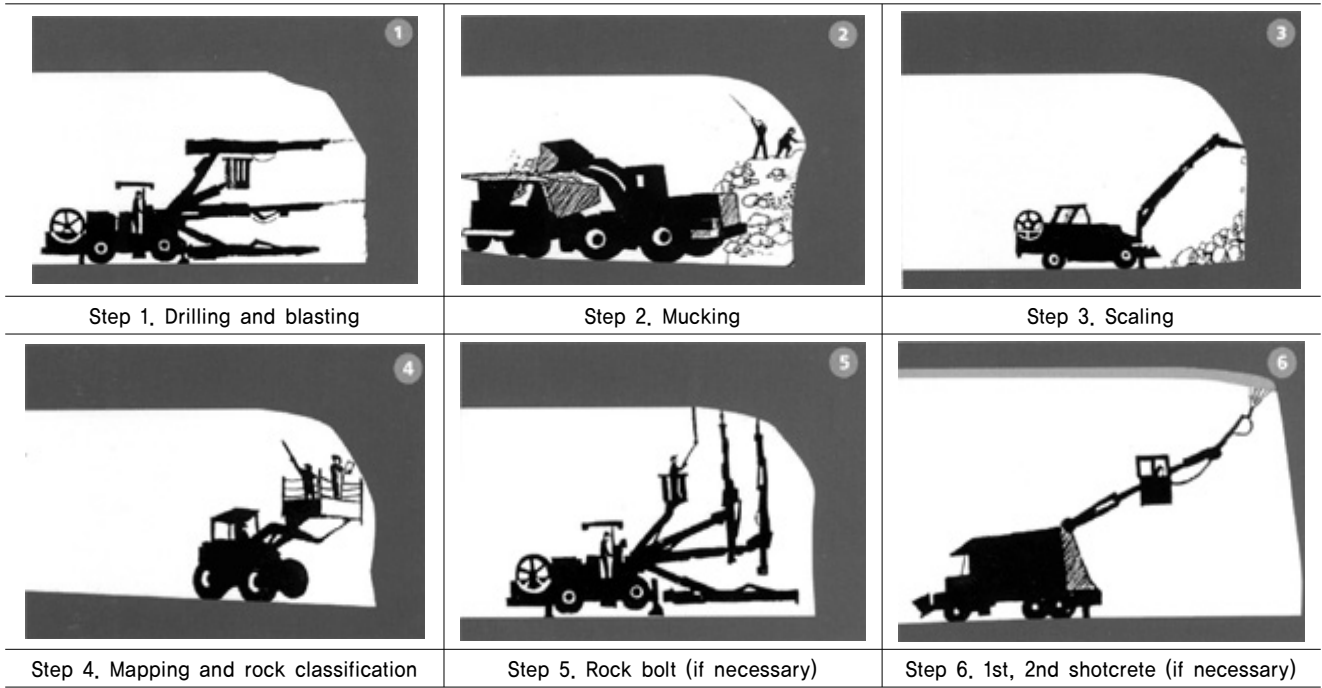


Fig. 3. Construction procedure of single shell NATM

글셀 터널의 시공순서를 보여준다.

싱글셀에 사용하는 고품질 강섬유 보강 슛크리트는 종래의 콘크리트에 비하여 고강도이고 강섬유에 휨인성이 개선되어 장기적인 품질 및 안전성의 확보를 목적으로 하고 있다. 또한 콘크리트 구조물의 Life cycle 관점에서 보면 지보능력의 향상(고강도, 고인성, 고내구성) 및 시공능력의 향상(낮은 리바운드율, 대량 뽑어붙이기, 저분진)이라는 고품질화에 따라 전체 시공비의 저감 효과가 기대된다.

3. 시공 사례 분석

터널 계획 시 역학적으로 전달력이 전달되는 일체 구조가 합리적이며, 막장 후방에서 거푸집을 사용하여 별도의 공정으로 시공되는 2차 라이닝이 생략될 수 있다면 큰 공기 단축 효과를 통해 시공의 합리화가 가능하다고 판단되며 이와 관련되어 많은 연구들이 이루어지고 있다. 또한 이러한 연구 결과를 바탕으로 2차 라이닝을 생략하는 Single shell NATM 터널의 시험시공과 실제 설계 및 시공이 이루어지고 있다.

국내의 시공 사례들에 대하여 정리하고자 한다.

3.1 경부고속철도 00-0공구 01터널

경부고속철도 00-0공구 01터널의 경사갱에 적용되었으며, 현재 시공 완료되어 열차가 운영 중에 있다. 경사갱 크기는 H(굴착 높이) 6.635m, D(굴착 폭) 8.000m이며, 굴착량은 48.442m²이다. 지보패턴 1~3구간에는 2차 라이닝을 타설하지 않는 무라이닝 상태이고 일반 슛크리트(21MPa)로 마감하였으며, 갱구부와 본선 접속부에 대하여 안정성 확보를 위해 2차 콘크리트 라이닝을 타설하여 안정성을 확보하였다.

3.2 경부고속철도 00-0공구 02터널

경부고속철도 00-0공구 02터널 경사갱에 적용되었다. 원 설계 시 비상 시 대피 안정성 확보 및 공사 중 작업갱으로 활용하는 것으로 계획하였으나 터널 정량적 위험도 평가(QRA)에 의한 분석 결과 경사갱이 불필요한 것으로 분석되었다. 현재 변경 설계를 완료하였으며 시공 준비 중에 있다. 경사

갱 크기는 H(굴착 높이) 6.635m, D(굴착 폭) 8.000m이며, 굴착량은 48.442m²이다. 원설계에서는 경사갱 전 구간에 대하여 2차 콘크리트 라이닝을 타설하는 것으로 계획하였으나 변경 설계 후 2차 라이닝을 타설하지 않는 무라이닝 상태이고, 일반 쏫크리트(21MPa)로 마감하였으며 구조물의 안정성 확보를 위해 갱구부와 본선 접속부에 대하여 2차 콘크리트 라이닝을 타설하였다.

3.3 원주~강릉 철도건설 제0공구 03터널

원주~강릉 철도건설공사 제0공구 03터널의 경사갱에 적용되었다. 경사갱 크기는 H(굴착 높이) 6.618m, D(굴착 폭) 8.343m이며, 굴착량은 54.80m²이다. 03터널은 장대 터널로서 시공 공기 확보를 위하여 공사 중 작업용 경사갱이 계획되었으며 현재 시공 중에 있다. 원주~강릉 구간은 산악구간으로서 지반조건이 매우 양호하며, 지하수 영향 역시 적을 것으로 판단되어 경사갱의 2차 라이닝을 타설하지 않는 것으로 계획되었다. 또한 최근 경사갱 관련 라이닝 적용기준에서 지반조건, 경사갱의 활용 용도 등을 면밀히 검토하여 2차 라이닝 타설 구간과 두께를 변경할 수 있도록 개정된 사항을 고려하여 2차 라이닝을 타설하지 않는 것으로 반영하였다. 지보패턴 1~5구간 전 패턴에 대하여 일반쏫크리트(21MPa)로 마감하였고, 2차 라이닝을 타설하지 않는 무라이닝으로 계획하였으며 갱구부와 본선 접속부에 대하여 2차 콘크리트 라이닝을 타설하여 안정성을 확보하도록 하였다.

3.4 성남~여주 제0공구 04터널

성남~여주 철도건설공사 제0공구 04터널의 경사갱에 적용되었다. 현재 시공 중에 있다. 경사갱 크기는 H(굴착 높이) 5.100m, D(굴착 폭) 5.100m이다. 토피고, 지반조건 등을 고려하여 계획을 수립하였다. 암반등급 I, II(RMR 61~100) 등급의 양호한 암반구간에 대하여 일반쏫크리트(21MPa)로 마감하였고 2차 라이닝을 타설하지 않는 것으로 계획하였다.

3.5 00댐 철도이설공사 05터널

00댐 철도이설공사 05터널의 경사갱에 적용되었으며, 현재 시공 중에 있다. 경사갱 크기는 H(굴착 높이) 7.030m, D(굴착 폭) 7.500m이며, 굴착량은 48.58m²이다. 토피고, 지반조건 등을 고려하여 계획을 수립하였다. 지보패턴 1~3의 양호한 암반구간에 대하여 2차 라이닝을 타설하지 않는 것으로 계획하였다. 지보패턴 P-1~3 패턴에 대하여 2차 라이닝을 타설하지 않는 무라이닝으로 계획하였으며, 고강도 쏫크리트(30MPa)로 마감하였고, P-4~6 패턴에 대하여 라이닝을 타설하는 것으로 계획하였다.

3.6 서해선 건설공사 제0공구 06터널

서해선 건설공사 제0공구 06터널의 경사갱에 적용되었으며, 현재 시공 중에 있다. 경사갱 크기는 H(굴착 높이) 5.640m, D(굴착 폭) 6.440m이며, 굴착량은 34.24m²이다. 토피고, 지반조건 등을 고려하여 계획을 수립하였다. 지보패턴 1~3의 양호한 암반구간에 대하여 강섬유 보강 쏫크리트로 마감하였으며, 2차 라이닝을 타설하지 않는 것으로 계획하였다.

3.7 도담~영천 제0공구 07터널

도담~영천 철도건설공사 제0공구 07터널의 경사갱에 적용되었다. 현재 실시설계 완료 후 시공 중에 있다. 경사갱 크기는 H(굴착 높이) 5.640m, D(굴착 폭) 6.440m이며, 굴착량은 34.25m²이다. 토피고, 지반조건 등을 고려하여 계획을 수립하였다. 지보패턴 1~5구간 전 패턴에 대하여 2차 라이닝을 타설하지 않는 무라이닝으로 계획하였으며 고강도 쏫크리트로 마감하였고, 갱구부와 본선 접속부에 대하여 2차 콘크리트 라이닝을 타설하여 안정성을 확보하도록 하였다.

3.8 국내 사례 요약

싱글셸 개념을 적용한 국내 사례 조사 결과는 Table 3과 같다. 기본계획에서는 전 패턴에 2차 콘크리트 라이닝을 타

Table 3. Construction condition and design of domestic access tunnel

Item	Type-1	Type-2	Type-3	Type-4	Type-5	Type-6
Basic plan	30 cm	30 cm	30 cm	30 cm (or steel)	35 cm (steel)	30 cm (steel)
Gyeongbu high speed rail 00-0 ction	-	-	-	30 cm	35 cm (steel)	30 cm (steel)
Gyeongbu high speed rail 00-0 section	-	-	-	30 cm (steel)	30 cm (steel)	30 cm (steel)
Wonju-Gangneung 0 section	-	-	-	-	-	35 cm (steel)
Seongnam-Yeouju 0 section	-	-	-	30 cm (steel)	30 cm (steel)	30 cm (steel)
00 Dam shifting of railway	-	-	-	30 cm	30 cm (steel)	30 cm (steel)
Seohae line construction work 0 section	-	-	-	30 cm (steel)	30 cm (steel)	30 cm (steel)
Dodam-Yeongcheon 0 section	-	-	-	-	-	30 cm (steel)

설하는 것으로 계획하였다. 싱글셀 개념을 적용한 현장은 시공 시 막장관찰 및 계측결과를 통해 변경된 지질 및 지반 조건 등을 고려하여 지보패턴 1~3에 대해 2차 콘크리트 라이닝 없이 시공하고 변경하는 것을 알 수 있었다. 또한 원주~강릉 제0공구와 도담~영천 제0공구의 경우 1~5 패턴에 대하여 2차 콘크리트 라이닝을 삭제한 것을 알 수 있다. 국내의 경우 최근 개정된 관련 기준에 따라 지반조건이 양호한 일부 구간에 대해 경사경의 2차 콘크리트 라이닝을 삭제하고 있는 상황이다.

4. 싱글셀 NATM 현장 적용성 제한

4.1 개요

본 연구에서는 00터널의 경사경에 대하여 라이닝 삭제 방안을 검토하고 현장 적용을 검토하고자 하였다. 본 장에서는 경사경의 NATM 구간에 대해 싱글셀 터널의 개념을 검토하기 위하여 2차 지보재인 라이닝 삭제 및 변경에 대한 적정성 및 안정성을 검토하고자 하였다. 터널 안정성 검토는 수치해석 기법을 이용하여 범용 프로그램인 FLAC 2D를 사용하여 터널 굴착 시와 굴착 완료 후로 구분하여 터널 구조물의 안정성 검토를 수행하였다.

4.2 적용 현장 터널 지보패턴별 안정성 평가

본 연구에서는 터널 굴착 시와 터널 굴착 완료 후로 구분하여 수치해석 범용 프로그램인 FLAC 2D를 이용하여 터널 안정성 검토를 수행하였다. 터널 굴착 시에는 Mohr-coulomb 모델을 적용하였고, 터널 굴착 완료 후에는 Burger's 모델을 적용하였다. 수치해석 모델링 및 지반조건은 Table 4와 같다.

4.2.1 터널 굴착 시 안정성 검토 결과

터널 굴착 시 안정성 검토 결과는 터널의 천단 변위 및 내공 변위와 주지보재인 슛크리트 및 록 볼트 부재에 작용하는 응력 및 축력을 통해 허용기준치 이하일 경우 터널 안정성이 확보되며 허용기준을 초과할 경우 추가 보강 등을 통해 터널 안정성을 확보할 수 있다. 해석결과는 Table 5와 같다. 각 지보패턴별 변위는 최대 천단 변위의 경우 축압계수 1.0에서 0.37~2.30mm가 발생되었으며, 최대 내공 변위의 경우 축압계수 1.5에서 0.85~6.94mm로 나타났다. 각 지보패턴별 지보재 응력은 슛크리트의 경우 최대 휨 압축응력이 축압계수 1.5에서 0.55~3.41MPa로 허용치인 8.4MPa 이내로 나타났고, 록 볼트의 경우 최대 축력이 3.76~48.50kN으로 허용치인 86.0kN 이내로 나타났다. 검토 결과 지보재에 발생하는 응력이 모두 허용치 기준을 만족하며 터널 주변의 소성영역은 발생하지 않으므로 계획 지보공의 시행에 의해

Table 4. Ground condition and modeling of numerical analysis

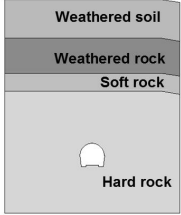
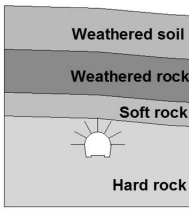
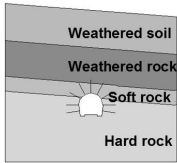
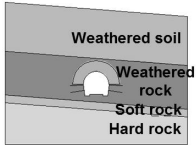
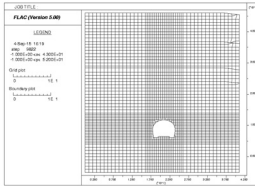
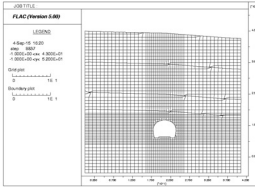
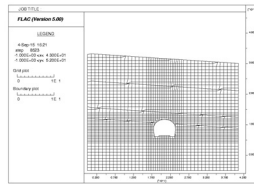
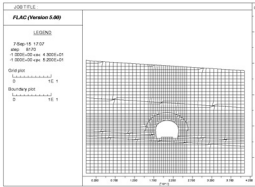
Item	EP-1	EP-2	EP-3	EP-4
Ground condition				
Modeling				

Table 5. Result of numerical about excavating tunnel

Item	Crown displacement (mm)	Convergence displacement (mm)	Shotcrete moment (MPa)		Rockbolts axial (kN)		Evaluation
			Results	Allowance	Results	Allowance	
EP-1	0.37 (ko=1.0)	1.09 (ko=1.5)	0.55 (ko=1.5)	8.4	-	86.0	O.K
EP-2	0.44 (ko=1.0)	0.85 (ko=1.5)	0.71 (ko=1.5)	8.4	3.76 (ko=1.5)	86.0	O.K
EP-3	1.75 (ko=1.0)	1.00 (ko=1.5)	1.56 (ko=1.5)	8.4	15.39 (ko=1.5)	86.0	O.K
EP-4	2.30 (ko=1.0)	6.94 (ko=1.5)	3.41 (ko=1.5)	8.4	48.50 (ko=1.5)	86.0	O.K

터널 안정성은 확보되는 것으로 판단되며 변위 또한 크지 않으므로 터널 안정성에는 문제가 없는 것으로 나타났다.

4.2.2 터널 굴착 완료 후 안정성 검토 결과

터널 굴착 완료 후 장기 안정성 검토는 시간이력의 크랩 해석을 통해 수행하였으며 해석 결과 터널 굴착 후 1년에서 5년 후 발생 변위량 중 최대값은 Table 6과 같다. 각 지보패턴별 5단계에서 최대값으로 나타났으며, 천단변위의 경우 4.76~158.20mm가 발생하였고, 내공변위의 경우 5.45~463.00mm로 나타났다. EP-1~2의 경우 천단 변위(15mm) 및 내공 변위(30mm) 모두 기준치 이하로 나타났지만 EP-3~4의 경우 변위 기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 또한 EP-3~4의 경우 시간의 경과에 따른 변위 증가량이 급격히 증가하는 양상을 보이고 있다.

4.3 안정성 검토 및 현장 적용 결과 요약

본 연구에서는 경사경의 NATM 구간에 대해 싱글셀 개념을 현장에 적용하여 2차 지보재인 라이닝 삭제에 대한 적정성

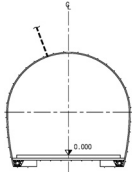
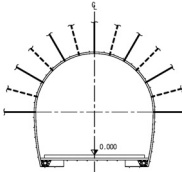
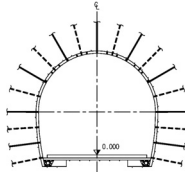
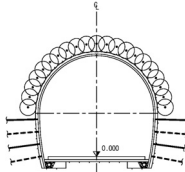
및 수치해석 기법을 이용하여 안정성을 검토하였다. 안정성 검토는 유한차분법과 장기적 변형 거동을 고려한 Creep 해석을 수행하였다. 안정성 검토 결과 암반상태가 양호한 구간에 대하여 라이닝을 설치하지 않을 경우에 대하여 영구 구조물로서 안정성 확보가 가능한 것으로 검토되었다. 또한 장기적 안정성 검토인 Creep 해석 결과 지반조건이 불량한 구간에서 과도한 변형이 발생하며 장기적 안정성 확보가 어려운 것으로 검토되었다. 지반조건이 불량한 구간은 장기적 안정성 확보를 위해 2차 라이닝을 타설하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

설계 및 시공 사례와 안정성 검토 결과를 종합적으로 분석한 결과 암반상태가 양호한 구간(II, III, IV 등급)은 라이닝 미설치가 가능한 것으로 검토되었으며, 안전성 확보를 위하여 고강도 슛크리트를 적용하며 갱구부, 방향전환소 및 본선 접속부 구간과 암반상태가 불량한 구간(V 등급)은 장기적인 변형으로 인해 구조물의 안정성 확보가 어려우므로 2차 라이닝 설치가 타당하다고 판단된다. 이상의 종합 검토 결과를 바탕으로 싱글셀 개념을 적용한 지보패턴을 Table 7과 같이 제안하고자 한다.

Table 6. Result of numerical about excavating tunnel

Item	Crown displacement (mm)					Convergence displacement (mm)				
	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5
EP-1	0.63	1.01	2.05	3.40	4.76	4.63	5.36	6.98	9.56	12.48
EP-2	0.82	1.63	2.70	4.24	6.35	2.78	3.25	4.40	6.24	9.03
EP-3	2.59	2.84	7.74	14.69	24.83	2.33	2.96	3.67	4.55	5.45
EP-4	22.91	57.00	90.27	121.60	158.20	122.33	205.30	288.10	374.10	463.00

Table 7. Support pattern of site application in the 00 access tunnel

Item		EP-1 A	EP-2 A	EP-3 A	EP-4 A
Overview					
Rock classification	RMR	At least 60	41-60	21-40	20 or less
	Q	At least 10	1~10	0.1~1	0.1 or less
Excavated method		Full face	Full face	Full face	Half face
Excavated length		2.5	2.0	1.5	1.2/1.2
Shotcrete	Thickness (mm)	50 (normal)	80 (fiber)	120 (fiber)	120 (fiber)
	Addition	50 (if necessary)	50 (if necessary)	-	-
Rockbolt	Length (m)	3.0	3.0	3.0	3.0
	Longitudinal (m)	2.5 (if necessary)	2.0	1.5	1.2
	Lateral (m)	1.5 (if necessary)	1.5	1.5	1.2
	Longitudinal (m)	-	-	1.5	1.5
	Size			LG-50×20×30	LG-50×20×30
Concrete lining		-	-	50 (if necessary)	300 (steel)
Reinforcement support		-	-	Forepoling (if necessary)	Micro injection grouting

5. 고찰

본 연구에서는 시공성이나 경제성 측면에서 다양한 장점을 지닌 싱글셀 터널 라이닝 공법을 도입하기 위한 기초적인 연구를 수행하고자 하였다. 본 장에서는 공학적으로 합리적이고 타당성 있는 싱글셀 NATM을 국내의 실정에 맞게 보급하기 위한 주요 사항들에 대하여 고찰하고자 한다. 본 연구에서는 분리된 이중 구조 터널 라이닝과 일체된 싱글셀 구조의 터널 라이닝의 파괴 메카니즘에 대한 이론적 검증을 수행하였다. 검토 결과 운영 중 상태를 고려한 2차 라이닝 콘크리트를 배제하더라도 터널의 안정성은 충분히 확보가 가능한 것으로 알려져 있다. 다만 NATM 터널에 대하여 장기적 관점에서 시간 경과에 따라 지보재의 내구성이 감소하며 터널의 안정성에 문제가 발생할 수 있고, 이로 인하여 터널의 안전성에 큰 영향을 줄 수 있으며 장기안정성 확보를 위하여 지보재의 내구성 확보가 필요하다고 판단된다. 싱글셀은 기존의 NATM과 비교하여 경우에 따라 공사비가 낮아질 가능성이 있고 공기도 단축할 수 있다. 지반조건이 불량한 구간(토사 지반, 취약한 지반, 용수가 많은 지반, 또는 팽윤성이 염려되는 지반 등)에 대해서는 높은 복공 지보강성이 요구되며, 보조공법의 채택 또는 콘크리트 라이닝을 포함한 검토를 별도로 하는 것이 바람직하다고 생각한다.

먼저 슛크리트 복공의 경우 터널 비상용 시설·조명 등의 취부나 터널 내의 친환경(주행자의 심미성, 안정성 등)을 고려한 복공면의 마무리 방법, 시공법을 어떻게 할까가 중요한 테마로서 좀 더 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 두 번째로 록 볼트의 경우 고내력, 내부식성 Bolt의 사용을 조건으로 FRP Bolt의 채택을 생각하고 있지만, 강재 Bolt보다도 소재로서의 전단 내력이 작은 점을 고려하면 지반의 변형특성에 적합한 록 볼트의 선택을 신중하게 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다. 그 외에 복공과 지반의 부착력 확보는 NATM에서도 중요한 문제이지만 그 확인 시험 방법은 확립되어 있지 않으며 아직 개념적인 취급으로 되어 있다. 고품질의 얇은 복공의 유용성을 확인하기 위해서는 시험방법의 정립이 필요할 것으로 판단된다. 또한 장대 터널에 적용 시 슛크리트의 경우에는 조도계수(거칠기)가 커서 교통량에 의한 환기량 및 기계에 의한 환기 시에도 효율이 저하되어 기계 환기를 적용하는 경우 제트팬의 추가 설치와 유지관리 시에 전력비 및 유지관리비의 증가가 발생할 수 있으므로 이와 관련된 지속적인 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 국내 싱글셀 터널의 공법 개발을 위하여 1차 지보재와 기본 메카니즘을 분석하고, 국내 싱글셀 NATM 터널 시공 사례들을 분석하였다. 또한 현재 경사 터널에만 국한되어 적용되고 있으며, 본선 터널 적용과 관련된 연구가 필요한 실정이므로 싱글셀 터널의 거동에 대한 유한요소 해석 및 Creep 해석 등을 수행하고 현장 적용성을 검토하였다. 이상의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 2차 라이닝을 생략하는 싱글셀 NATM의 국내 시공 사례 분석 결과 지반 조건이 양호한 연암 이상의 경우인 지보패턴 1~3등급의 조건에 대하여 2차 라이닝을 생략하는 것으로 설계 및 시공이 이루어졌으며, 장기적으로 안정성 확보가 곤란한 것으로 판단되는 지보패턴 4~6에서는 보조공법 적용 및 2차 콘크리트 라이닝을 타설하는 것으로 적용한 것으로 분석되었다. 우리나라의 경우 지층의 변화가 매우 심한 지반조건이 많으므로 터널의 안정성 확보를 위하여 싱글셀에 의한 터널링 방법은 가능한 지반조건이 양호한 개소에 적용하고, 장기적으로 안정성 확보가 곤란한 경우에는 철근콘크리트를 적용한 NATM 방법이 합리적일 것으로 판단된다. 국내의 경우 최근 경사경의 라이닝 삭제에 대한 설계 기준 개정 등이 진행되고 있는 추세이다. 또한 시공 중 공기 확보 및 방재, 유지관리 목적을 위해 설치되고 있는 경사경에 적용된 2차 지보재인 라이닝의 삭제는 시공성 및 경제성을 개선할 수 있는 방안으로 대두되고 있다.
- (2) 수치해석을 통한 싱글셀 터널의 안정성 검토 결과 암반 상태가 양호한 구간(II, III, IV 등급)은 라이닝 미설치 시 영구 구조물로서 장기적 안정성 확보가 가능한 것으로 검토되었으며, 지반 조건이 불량한 구간(V 등급)은 과도한 변형이 발생하고 장기적 안정성 확보가 곤란한 것으로 검토되었다. 그러므로 EP-1 패턴과 EP-2 패턴은 2차 라이닝을 미설치하고, 안정성 확보를 위하여 고강도 슛크리트를 적용하며 EP-3 패턴과 EP-4 패턴은 장기적 안정성 확보를 위해 2차 라이닝을 설치하는 것이 적절할 것으로 판단되어 싱글셀 개념을 적용한 지보패턴을 Table 7과 같이 제안하고자 한다.
- (3) 마지막으로 국내의 경우 지층의 변화가 매우 심한 지반 조건이 많으므로 싱글셀에 공법의 적용은 지반조건이 양호하고 용수가 적은 지반에 적용하는 것이 타당하다. 그러나 일반적인 터널 구조물 후보지는 다양한 암종 및 암반상태가 교차한다. 그러므로 장기적으로 안정성 확

보가 불가능한 구간은 싱글셸 보다는 철근 또는 콘크리트 라이닝 개념을 적용한 NATM 공법이 합리적일 것으로 판단된다. 최근 설계 기준 및 연구동향은 시공성 및 경제성 개선을 위한 라이닝 삭제 방안이 대두되고 있으며, 합리적이고 공학적인 설계 기준을 구축하기 위한 지속적이고 다양한 연구가 이루어져 할 것으로 판단된다.

References

1. Anderson, j. (1997), HSE report on NATM safety, Tunnel & Tunnelling, March, pp. 49~1.
2. Bae, G. J., Chang, S. H., Park, H. G. and Won, J. P. (2006), Experimental study on the improvement of shotcrete performance by addition of calcium aluminate based accelerator and metakaolin, Tunnelling Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 237~247 (in Korean).
3. Barton, N. R. (1995), Permanent support for tunnels using NMT. In rock engineering, ed. Hoek, E., Course note, pp. 1~26.
4. Broch, E. (2001), The inner lining system in norwegian rraffic runnels, 2001 International Symposium on Application of Geosystem Engineering, Seoul, Korea, pp. 3~13.
5. Kirland, C. (1996), NATM in the UK : the dabate for far, Tunnel & Tunnelling, September, pp. 38~40.
6. Korea Institute of Construction Technology (2006), Develop of the Korean single shell tunnelling method, Final Report, 03industry-academic cooperationA01-06, pp. 5~47 (in Korean).
7. Kovari, K. (1995), NATM概念の誤った考え方, トンネルと地下, Vol. 26, No. 11, pp. 65~76 (in Japanese).
8. Lee, D. H., Lee, S. K. and Bak, D. H. (2001), Design of tunnelling applied NMT in depth rockmass, 2001 Korean Rock Mechanics Conference, Korea Society for Rock Mechanics, Seoul, pp.1~15 (in Korean).
9. Shin, H. S. (2001), NMT (Norwegian Method of Tunnelling) and precast-concrete lining, 2001 Korean Rock Mechanics Conference, Korea Society for Rock Mechanics, Seoul, pp. 36~52 (in Korean).
10. Yang, W. S. (2010), Numerical analysis on the crack control of concrete lining reinforced by composite fibers, Journal of the Korean Geosynthetics Society, Vol. 9, No. 2, pp. 41~50 (in Korean).
11. Yu, C. W., Chern, J. C. and Snee, C. P. M. (2000), Creep characteristics of Soft rock and creep modelling of tunnel, World tunnel conference, AITES-ITA 2000 world tunnel conference 2000, pp. 565~572.