

## 국내의 터널기술 환경에서 조명한 프리캐스트 세그먼트 터널라이닝 공법

김승렬, Seung-Ryull Kim

주식회사 에스코컨설턴트 대표이사, President & CEO, ESCO Engineers & Consultant Company

### 1. 서 언

우리나라의 터널공법은 1980년대 초반을 중심으로 그 이전을 재래식 터널공법시대, 그 이후를 터널신공법시대(소위 NATM적용 터널공법)로 구분할 수 있다. 터널신공법은 부산지하철 등에서 간헐적으로 몇 차례 적용된 사실이 있었지만 서울지하철 3·4호선 도심부 건물 밀집 지역을 터널신공법으로 통과하는 시점을 터널신공법(NATM)의 본격적인 도입시기로 보는 것이 더 적합할 것으로 판단된다. 정확한 도입시기의 진위여부가 어떠한지 이 공법이 국내에 도입되어 성공적인 실적을 거둬오면서 재래식 터널공법은 급속하게 자취를 감추었고 비교적 짧은 시간 내에 NATM공법이 국내의 주된 터널공법으로 자리매김하게 되었다.

1990년대에 활발하게 추진된 턴키설계와 대안설계는 그동안 국내에서 잠복기를 겪고 있었다고 할 수 있는 NMT(Norwegian Method of Tunnelling)에 자극을 가하였고 급기야 2000년대 초에 대안터널공법의 옷을 입고 국내의 설계무대에 그 모습을 드러내었다. 이 NMT공법은 슛크리트라이닝과 록볼트를 최종 영구지보재로 취하는 공법이며, 이 공법이 적용되기 시작한 초기 단계를 거친 후에 등장한 내부 라이닝은(공법초기에는 내부라이닝을 설치 않았음) 방수와 결빙을 방지할 목적으로 설치하는 구조물이다. 양호한 지반조건에 터널에 굳이 현장타설 콘크리트라이닝을 시공할 필요가 있는가? 는 의견들이 일부 제시되기 시작하면서 NMT적용 터널의 방수·결빙 방지용 프리캐스트 세그먼트라이닝이 국내에서도 주목을 받고 있는 실정이다.

따라서 본고에서는 국내의 터널기술 환경 속에서 프리캐스트 세그먼트 터널라이닝 공법의 기본적인 기술사항을 살펴봄으로써 터널에서의 콘크리트라이닝의 역할을 재조명해보고 소위 진보적이라고 하는 기술이 국내시장에서 드러내는 한계성과 적용성 등에 대한 토론의 실마리를 제공하고자 한다.

### 2. 터널에서의 콘크리트라이닝의 역할

#### 2.1 지반반응곡선(ground reaction curve)과 지보개념

건설교통부 제정 터널설계기준(1999년)에 의하면 “콘크리트라이닝은 사용목적에 따라 구조체로서의 역학적 기능, 비배수형 터널에서의 내압기능, 영구구조물로서의 내구성 확보 및 미관유지 등의 기능을 가지며...(6.1.2항)”라고 기술되어 있다. 이 서술 내용을 살펴보면 콘크리트라이닝은 ‘사용목적’이 무엇인가에 따라 그 역할이 달라지게 된다는 것을 알 수 있다.

그렇다면 현재 일반적으로 국내에서 콘크리트라이닝의 사용목적은 어떻게 설정하고 있는가를 주의 깊게 살펴볼 필요가 있다. NATM에서 채택하고 있는 지보개념은 그림1에 나타난 지반과 지보재의 상호작용 개념으로 설명되어지고 있다.

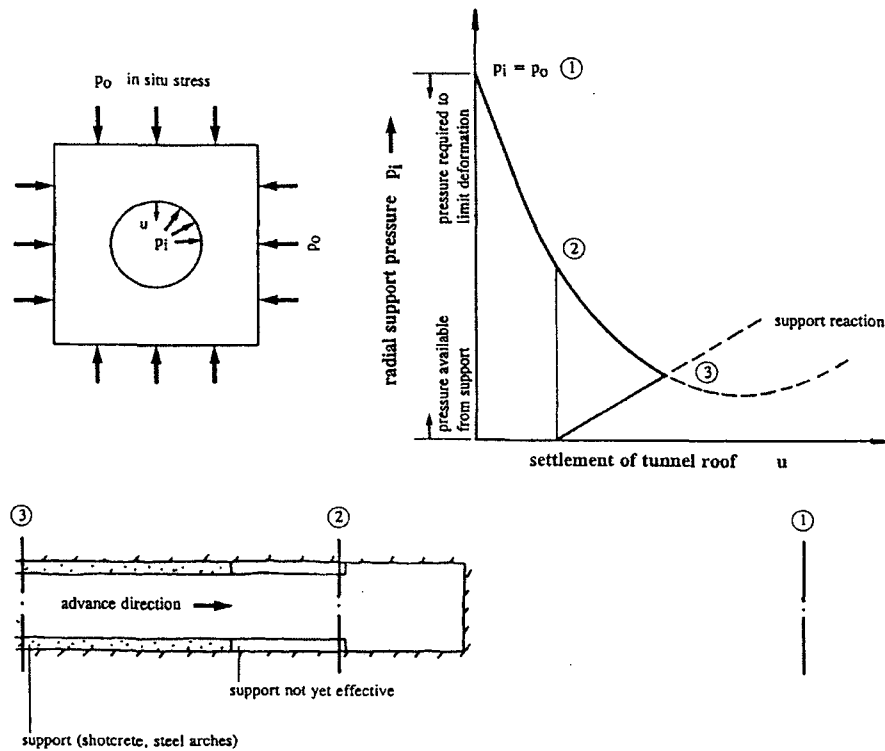


그림 1. 터널굴착면에서 반경방향의 응력과 지보재력과 관계곡선(ground reaction curve)

이 그림에 의하면 굴착면이 터널의 중심방향으로 이동하며 변위가 발생하게 되면 굴착면 주변의 지반에서는 아치 작용의 발현으로 인해 반경방향의 응력(지보재에 작용하는 응력)이 급격히 감소하게 된다. 따라서 굴착면의 반경방향 응력이 최소로 되는 시점에서 이 응력과 지보재력이 평형을 이루게 된다면 가장 경제적으로 터널을 형성할 수 있게 된다는 개념이다. 이 개념은 굴착면 변위의 제어를 통해 요구된 이상의 안정성을 확보하는 공법개념으로써, 종래 국내에서 적용하였던 재래식 터널 공법에 비해 지반자체의 지보능력 활용을 극대화하여, 경제적이며 안정된 터널을 구축하고자 하는 점에서 역학적으로 진보된 터널개념이라고 할 수 있다.

그러나 양호한 지반조건에서는 이러한 지반반응곡선(ground reaction curve)(또는 지반특성 곡선)이 뚜렷하게 나타나지 않는다. 또한 이 지반 반응곡선을 지보량을 결정하고 변경하는 '도구(tool)'로 사용하고자 하는 의도도 현실적이지 못하다. 다만, 이 곡선은 공법의 원리 또는 개념을 설명하는 것이라 할 수 있으며, 시공 중에 발생하는 지반거동의 분석을 통해 지보재량과 시공여건의 최적화를 도모하는 것이 공법의 핵심사항이라고 할 수 있다. 이 공법에서의 1차적인 지보재량은 지반조건과 그 지반조건에 적합한 경험적 판단에 근거하여 선정되고 있다고 할 수 있다.

## 2.2 NATM적용 터널공법에서의 지보재 역할

NATM적용 터널공법에서는 굴착후 굴착면에 시공된 록볼트, 강지보재, 슛크리트 등으로 구성된 슛크리트라이닝과 터널내부로 밀려들어오는 지반이 평형을 이루며 안정된 상태에 도달한 후 콘크리트라이닝을 설치하도록 하는 시공 순서를 채택하고 있다. 이때 설치되는 콘크리트라이닝이 외압을 지지하는 역학적인 기능을 발휘하도록 하느냐 아니면 미관유지 등의 부대적인 기능만을 발휘하게 되느냐 하는 문제는 전술한 바와 같이 전적으로 설계자가 슛크리트라이닝과 콘크리트라이닝의 역할을 어떻게 취급할 것이냐는 의도에 따라 달라진다. 다시 말하면, 배수형 터널에서는 지반이 터널 내부로 밀려들어오려는 힘을 지속적으로 발휘하고 있느냐? 그 크기는 어느 정도가 되느냐? 라는 문제와 슛크리트라

이닝이 영구지보부재로서의 역할을 수행할 수 있느냐? 아니면 없느냐? 하는 문제에 따라 콘크리트라이닝의 역할도 달라지며, 비배수형터널에서는 이 문제 이외에 추가로 콘크리트라이닝이 지하수압에 해당하는 외압에 견딜 수 있는 내력을 보유하여야 하는 문제를 가지게 된다.

국내에 NATM이 정착되는 초기단계에는 실제적으로 숏크리트라이닝의 내구성에 대해서는 아주 선명한 정의는 없었던 것으로 기억되지만, 설계 및 시공의 제반과정에 비추어보면 숏크리트라이닝은 영구구조체라는 개념 쪽을 취하였다고 필자는 생각한다. 이 공법의 초기 공급자(오스트리아 기술자)가, 의도적이지는 않았겠지만, 자기네의 공법의 우수성을 전파하는데 더 관심을 가지고 있음으로 해서 산악터널에서 쉽게 경험하였던 자기네 공법의 효용성이 자연스럽게 강조되었다고 할 수 있다. 이는 결국 숏크리트의 내구성을 확보하여야 하는 문제를 상대적으로 덜 강조하게 하였으며 마치 NATM적용 터널에서는 당연히 콘크리트라이닝에 하중이 작용하지 않는다는 측면의 개념이 우리기술 환경에 은연중 자리를 잡게 되는 계기를 제공하였다고 할 수 있다. 이러한 초창기의 분위기는 그 후 20여 년 동안 국내의 터널 기술현장에 머무르면서 숏크리트의 품질향상과 콘크리트라이닝의 역할에 대한 뚜렷한 규명과 연구에 대한 우리의 관심을 멀어낸 채 기존의 방법을 답습하며 터널시공을 지속하도록 하였다. 90년대 중반 이후에 들어서며 여러 가지 요인으로 인해 콘크리트라이닝에 균열 등이 발생하기 시작하자 지반조건이 열악한 천층터널에 대해서는 콘크리트라이닝을 철근으로 보강하는 방법을 채택하기 시작하였지만 역시 숏크리트가 임시지보재이며 콘크리트라이닝만이 영구지보재라는 뚜렷한 정의는 내려지지 않았다.

여기서, 쉽게 인지되는 사항으로는 숏크리트라이닝이 그 지보능력을 모두 발휘하여서 터널의 안정을 이루어낸 후에 콘크리트라이닝을 타설하였고 숏크리트라이닝은 내구성이 확보 되지 않아 시간이 경과하며 그 기능이 상실되어 간다면 콘크리트라이닝은 결국 숏크리트라이닝 대신의 지보재 역할을 담당하지 않으면 안 되게 된다는 사실이다. 이 경우에는 콘크리트라이닝에 분명한 역학적 기능을 부여하여야 하기 때문에 숏크리트라이닝은 임시 지보재라는 선언이 반드시 이루어져야 하고 이러한 선언아래서 제반 설계와 시공이 이루어져야 할 것이다.

그러나 암반이 양호한 지반조건 일 경우에는 대부분 굴착된 터널공동이 자립하게 되고 숏크리트라이닝의 지보능력(역학적 기능)도 크게 요구되지 않게 된다. 이 경우에는 시간이 경과하면서 숏크리트라이닝의 내구성이 점점 저하되는 경우가 발생하더라도 당장 콘크리트라이닝에 지반응력이 전달되지는 않게 된다. 이 현상은 재래식 터널의 경우를 살펴보면 더욱 분명해지게 된다. 재래식 터널은 대부분 굴착면에 숏크리트라이닝이 설치되어있지 않고 굴착면과 콘크리트라이닝 사이에도 공간이 존재하고 있음에도 불구하고 오랫동안 안정을 유지하고 있다. 따라서 이러한 지반에 굳이 콘크리트라이닝을 설치할 필요가 있느냐? 하는 문제를 제기 할 수 있게 된다. 그러나 터널에서의 콘크리트라이닝을, 지반을 지지하도록 하기 위해서만 설치해 놓은 것으로 그 기능을 한정 할 수 만은 없는 점 또한 기억할 필요가 있다. 필자의 소견으로는 아주 양호한 경암반 지역에 터널을 건설할 경우를 가정한다면 국내에서 현재 널리 적용하고 있는 숏크리트의 품질정도로서도 터널의 수명기간동안 안정을 유지할 수 있을 것이라고 판단하기 때문에 콘크리트라이닝의 생략 및 대체공법으로의 변경여부는 다분히 지반조건과 지보재의 역할(특히, 숏크리트라이닝의 역할)규명으로부터 분명히 도출해 낼 수 있는 과제라고 생각된다.

### 3. 프리캐스트 세그먼트 터널라이닝 공법의 개발배경

프리캐스트 세그먼트 터널라이닝 공법은 방수·결빙 방지 시스템(water and frost protection system)으로 적용하고 있는 내부라이닝(inner lining)공법 중의 하나이다. 이 공법은 노르웨이의 터널공법(NMT: Norwegian Method of Tunnelling)에서 주로 적용하는 공법이며 그 적용현황과 배경을 간단히 소개 하

면 다음과 같다.

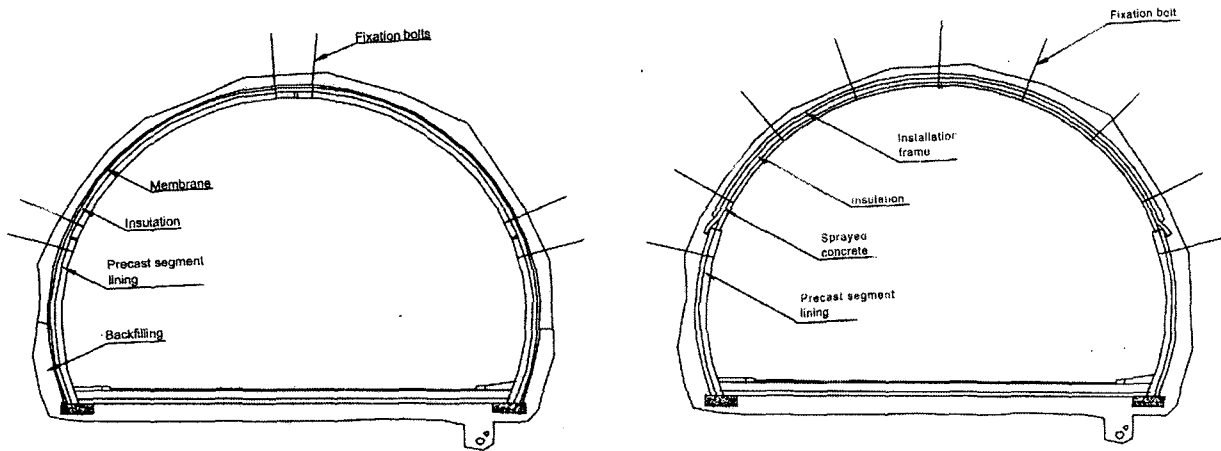
노르웨이는 전체면적의 2/3가 편마암이 우세한 선캠브리아 암반으로 덮여 있으며, 화강암, 반려암 및 규암 등이 대표적인 기반암을 구성하고 있다. 응용지질학 측면에서 보면 습곡과 단층의 지질 구조적 영향을 받은 경암반 지역으로 분류할 수 있다(Broch 등, 2002). 지형학적으로는 비교적 좁고 긴 형상을 하고 있는 나라로서 지진의 영향은 없는 지역이지만 비교적 험준한 산맥을 형성하고 있으며 가파른 피요르드식(fjord)해안선이 발달되어 있다. 국토의 면적은 약 39만 km<sup>2</sup>이고, 인구는 현재 약 450만 정도로 인구 밀도가 낮은 나라이다. 지형조건이 비교적 험준한 이유로 인해 도로건설에 많은 제약이 대두되었을 뿐만 아니라 지표면 도로에서의 잦은 사고 발생은 터널 건설을 촉진 시키게 되었다. 이러한 지형적 특성에 의해 터널의 효용성은 크게 증가되었지만 제한된 재원과 적은 교통량이라는 두 가지의 큰 요인에 의해 경제적인 터널건설을 우선시하게 되었다. 초기의 터널에서는 록볼트를 랜덤으로 시공하는 지보 시스템만을 적용하기도 하였다. 문헌에 의하면 이렇게 건설된 적은 교통량 터널에서 발생하는 사고는 터널건설 전의 지상도로에서 발생하는 사고보다 훨씬 적게 되어 저렴한(low cost) 터널의 효용성이 일반적으로 크게 인정되었다고 보고 되어 있다. 1960년 이후에 터널의 규모와 양이 급속히 증가하였고 급기야 2001년에는 노르웨이가 자랑하는 길이 24.5km의 도로터널(Lærdal tunnel)도 준공하기에 이르렀다.

노르웨이에서 적용하고 있는 내부라이닝 시스템(W&FPS: Water and Frost Protection System) 현황은 표1과 같고, 대표적인 2가지에 내부라이닝 시스템에 대한 것은 그림2와 같다.

표 1. 교통량에 따른 방수·결빙 방지 시스템의 적용현황

Method of W&FPS:	Tunnel class (AADT)				
	A (<2500)	B (2500- 5000)	C (5000- 10 000)	D (10 000- 15 000)	E (>15 000, two tubes)
WG-Tunnel fabric, not insulated	○ <sup>1</sup>				
Miljøhvelv, insulated(metal sheet W&FPS)	●	●	○ <sup>2</sup>		
PE-foam w/60 mm sprayed concrete, steel fibres	●	●			
PE-foam w/70 mm sprayed concrete, mesh reinforced	●	●	●*	●*	●*
Concrete elements	●	●	●	●	●
Cast concrete with membrane	●	●	●	●	●

○<sup>1</sup>=may be used up to AADT 1000 (Annual Average Daily Traffic) and below a given frost limit( $F_{10T} < 20000 \text{ h } ^\circ\text{C}$ ). ○<sup>2</sup>=concept is modified tunnel class C. ●\*=concrete wall elements must normally be used.



(a) 전단면 프리캐스트 세그먼트 내부라이닝

(b) Ekeberg형 내부라이닝

그림 2. 전단면 프리캐스트 세그먼트형과 Ekeberg형 내부라이닝 설치 개념도

방수·결빙방지용 내부라이닝 시스템(W&FPS)은 숏크리트라이닝을 터널의 최종 영구지보재로 취하고 동절기 이외 기간에는 터널내부로 유입되는 지하수가 노면에 떨어지는 것을 방지하고 동절기에는 이로 인해 노면이 결빙되거나 숏크리트라이닝과 지반이 반복적인 동결·융해 작용을 받아 열화되는 현상을 방지하기 위해 숏크리트라이닝 면과 최소 20cm이상 이격시켜 설치하는 내부라이닝 시설의 일체를 말한다.

노르웨이의 초기 터널에서는 내부라이닝을 생략하는 사례도 있었으며, 교통량이 적은 터널에서는 아주 경량인 방한재와 알미늄판, 철판이나 PVC막 등을 내부라이닝의 일환으로 적용하기도 하였다. 근래에 접어들며 터널내부의 교통량이 증가하게 되자 안전성과 내부환경의 미적요소 등이 강조되면서 고가의 내부라이닝을 설치하고 있다. 노르웨이에서는 현장타설 콘크리트 내부라이닝이 가장 고가의 방수·결빙방지용 내부라이닝이며 프리캐스트 세그먼트라이닝을 적용하더라도 '결빙시간온도'(10년 빈도의 최대 값으로 최저온도×최저온도지속일수×24의 값)가 큰 지역에서는 방수막과 폴리에틸렌매트(PE-mat)을 프리캐스트 세그먼트라이닝 배면에 설치하도록 규정하고 있다(그림2(a) 및 그림3 참조). 결빙방지에 가장 효과가 큰 내부 라이닝은 폴리에틸렌매트로 보고 되고 있다. 그러나 이러한 재질은 인화성이 크고 화재시 유독가스를 발생시키는 문제가 있기 때문에 이 매트내면을 약 6cm정도 두께의 방화용 숏크리트로 덧씌우도록 하고 있다. 실재 화재 시에도 방화용 숏크리트로 인해 폴리에틸렌매트가 인화되지 않았었다고 보고 되어 있다.

1960년대 이후부터 개발되고 시험된 내부라이닝의 종류만도 약 20여종에 이르렀으나 대부분의 내부라이닝시스템이 교통량이 생산한 공기압이나 기타의 복잡한 하중조건으로 인해 성공적이지 못하였으며 오직 몇 가지의 유효한 내부라이닝 시스템으로 귀착 되었다. 1995년에 노르웨이 도로국에서는 그 동안의 경험을 바탕으로 내부라이닝 설계지침(Design Guide 163)을 정하였다. 이 설계지침에 의하면 내부라이닝은 경량재와 여러 종류의 콘크리트계 재질 또는 이들을 조합한 형태로 이루어져 있다.

노르웨이의 내부라이닝의 변천과정을 눈여겨보면 그 이면에는 적은 교통량(low traffic)에서 출발한 경제적인 터널(low cost tunnel) 건설이라는 목표가 오랜 기간동안 터널기술 발전과정에 깊은 영향을 미쳐왔으며, 그 영향도 근래에 발생한 교통량의 증가에 따른 이용자에 대한 안전성의 증진 필요성이라는 명제를 더 이상 외면하지는 못하고 있음을 알 수 있다.

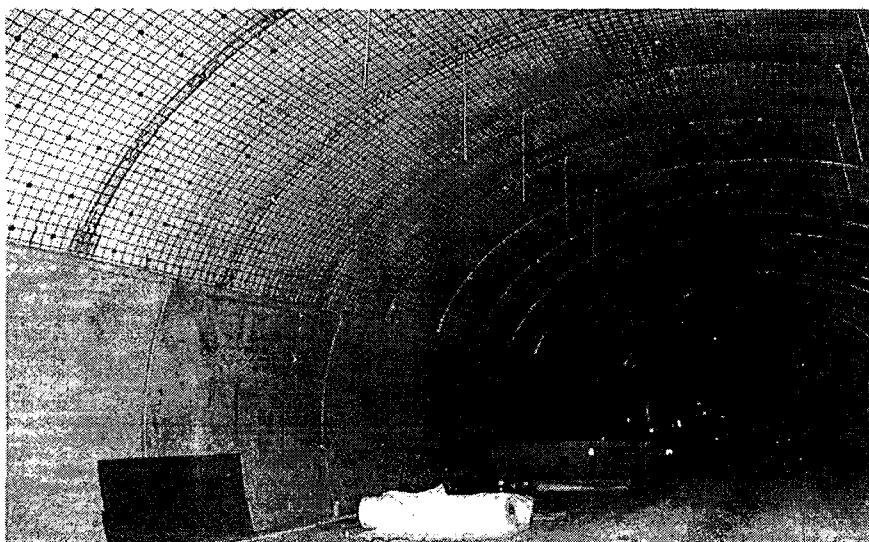


그림 3. Ekeberg형 W&FPS 설치 전경 (방화용 내부 숏크리트 타설전)

2002년 10월 현재, 노르웨이에서는 전단면 프리캐스트 세그먼트 내부라이닝도 적용되고는 있지만 측벽에만 프리캐스트 세그먼트를 설치하고 천장부에는 방화용 슛크리트막으로 피복한 폴리에틸렌매트(PE-foam mat)를 설치하는 이른바 수정 Ekeberg형 내부라이닝이 주로 적용되고 있다(그림 3 참조). 이 시스템은 전단면 프리캐스트 콘크리트라이닝 형식에 비해 경량일 뿐만 아니라 측벽이 어느 정도의 차량 충돌 하중에도 견딜 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 노르웨이는 우리나라의 경우처럼 어느 시스템을 표준화하여 일률적으로 적용하고 있지는 않는 것으로 판단된다. 즉 설계자가 표준화 제도로부터 받는 제약이 적고 스스로 선택할 수 있는 기술의 폭이 많이 허용되고 있다.

국내에서 주목을 받고 있는 전단면 프리캐스트 세그먼트 내부라이닝은 1990년대에 출현한 내부라이닝 시스템으로서 교통량이 많은 터널에 국한하여 적용되었다. 이 내부라이닝 시스템에는 방수 목적으로 배면을 방수막으로 둘러싸도록 하고는 있으나, 결빙방지시설(PE-foam mat 등)은 지역의 온도에 따라 또는 갱구부 등 온도 영향이 큰 터널의 부위에 따라 설치하는 경우도 있고 그렇지 않은 경우도 있다. 프리캐스트 세그먼트는 통상 터널의 횡방향으로 4~5편을 조립하며 터널의 종방향의 세그먼트 크기는 측벽용 세그먼트가 5~6m, 천장용 세그먼트가 2~3m이다. 터널의 횡방향(원주방향) 세그먼트 길이는 4~6m 정도를 표준으로 하며 터널의 크기에 따라 횡방향 조립 세그먼트의 개수와 길이를 다르게 취하고 있다. 두께는 15cm이며 재령 28일 압축강도로는 380kgf/cm<sup>2</sup>가 표준이다.

프리캐스트 세그먼트는 고정볼트에 의해 터널굴착면 주변의 암반에 매달려 있는 형태가 되기 때문에 고정볼트 시공에 만전을 기하지 않으면 안 된다. 특히 고정볼트의 내구성 확보가 중요하며 시공오차도 ±5mm이내가 되어야 조립에 지장이 없게 된다. 이 고정볼트는 프리캐스트 세그먼트 내부로부터 방수막을 뚫고 암반 속에 안전하게 고정되어야 하기 때문에 방수막 손상이 필연적이어서 방수막 손상부위에 대한 방수대책이 필요하게 된다. 아울러 여굴이 크게 발생된 구간의 고정볼트는 적은 여굴 부위의 고정볼트에 비해 횡방향 유연성이 크게 증가되는 점도 간과하여서는 안 될 기술사안 중의 하나이다. 이러한 내부라이닝 공법은 무엇보다도 세그먼트 간의 조립정도(accuracy)에 따라 미관 부분도 영향을 받는다. 전체적으로는 패턴형상의 확실한 선행 균열을 갖는 동시에 암반을 지지하는 능력은 없는 내부라이닝 시스템이다. 또한 이 내부라이닝 시스템은 변화단면에 대한 적응성이 불량하여 단면변화부에서는 다른 형태의 내부라이닝 시스템과 병용하여 적용하여야 하는 시공성을 가지고 있으며 라이닝 자체가 환기팬 등과 같이 비교적 무거운 내부설비 시설을 지지할 수 있는 기능도 보유하지 못한다.

#### 4. 노르웨이 터널 공법에서 슛크리트라이닝과 록볼트의 역할과 구비조건

조립식 방수·결빙용 내부라이닝을 적용하고 있는 노르웨이 터널공법에서는 슛크리트라이닝(sprayed concrete)과 록볼트가 터널의 안정을 확보시키는 완전하고도 영구한 지보부재가 된다. 슛크리트와 록볼트의 량을 정하기 위하여 자국에서 정립한 암반분류 시스템인 Q-시스템을 사용하고 있다. 암반의 공학적인 특성을 나타내는 Q값은 6개의 인자를 서로간 나누거나 곱하여 산정하기 때문에 Q값 산정 시에 개입될 수 있는 오차의 영향정도가 인자의 합산으로만 결정되는 RMR 값에 비해 크다고 할 수 있다. 지보재량은 막장에 나타나는 실제의 지반현황의 평가로부터 이루어지고 있기 때문에 숙련된 터널기술자의 현장평가는 아주 필수적이고 중요한 터널시공 요소이다. 양호한 암반지역의 터널일 경우에는 슛크리트라이닝과 록볼트 만으로 마무리하게 되지만, 암반조건이 아주 열악한 경우 (swelling rock 또는 squeezing rock 등)에는 추가의 보강지보재를 사용하거나 현장타설 콘크리트라이닝을 지지부재로 채택한다. 연약한 지반에서 터널을 시공할 경우에는 NMT적용 터널공법에서도 계측을 실시하고 그 결과로부터 안정성을 확인하며 시공하고 있다.

앞에서 이미 언급한 바와 같이 프리캐스트 세그먼트 터널라이닝은 방수·결빙 방지용 내부라이닝의 일종이고 슛크리트라이닝 면과도 20cm이상 이격되어 있기 때문에 이로부터 지반을 지지해주는 기능을

기대 할 수는 없다. 결국, 노르웨이의 터널기술자들은 슛크리트라이닝과 록볼트 만으로 터널을 영구적으로 안정시키기 위한 기술을 부단히 발전시키지 않으면 안 될 기술 환경에 놓여 있었다고 할 수 있다. 이러한 오랜 기간동안의 일련의 과정으로부터 정착되어온 것으로서, 프리캐스트 세그먼트라이닝 적용 터널공법에서 슛크리트와 록볼트의 품질확보상 요구하고 있는 사항들을 몇 가지 나열하면 다음과 같다.

- 프리그라우팅을 실시하여 용출수를 일정량 이하가 되도록 조치하도록 하고 있다. 이것은 용출수가 많은 지역에 슛크리트를 타설할 경우에는 요구되는 품질을 얻기 어려움을 의미한다.
- 재령 28일의 강도가 350kgf/cm<sup>2</sup>이상인 고강도 슛크리트를 사용한다. 이는 고강도에 따른 지지능력 향상측면 보다는 내구성 확보 차원에 더 비중을 두고 있는 것으로 판단된다.
- 최종구조물로서 내구성 확보를 위해서는 치밀한 슛크리트가 되어야하며 (습식 슛크리트) 균열발생을 억제하도록 하고 있다.
- 알칼리프리 액상형 급결제(alkali free accelerator)를 사용하여 슛크리트의 강도 저하를 방지하고, 알칼리-골재반응(alkali-aggregate reaction)의 위험성을 감소시킴으로써 슛크리트가 내구성을 보유하도록 한다. 특히, 알칼리프리 급결제는 작업원의 건강과 환경보호차원에서 권장되고 있다.
- 그럼에도 불구하고 슛크리트라이닝은 완전 방수 기능을 갖는 구조체(a completely drip free structure)로 인정하지 않는다.
- 록볼트는 부식이 방지되도록 조치하거나 부식되지 않는 재료의 록볼트를 사용하며, 정착용 모르타르는 무수축 모르타를 사용한다.

성공적인 영구 슛크리트라이닝을 시공하기 위해서는 암반조건에 적합한 량의 양호한 품질의 지보재를 설치하여야 한다. 즉, Q-시스템 암반분류를 기본으로 하여 경험적으로 정립한 설계와 시공차트로부터 지보재량을 산정하기 때문에 지반평가와 지보재선정에 익숙한 터널기술자와 시공기술자가 필요하다.

## 5. 싱글셸(single shell)과 더블셸(double shell) 지보개념

스�크리트라이닝과 록볼트를 터널의 최종 영구부재로 간주하는 노르웨이 터널공법(NMT)를 ‘싱글셸 공법’, NATM적용터널 공법을 ‘더블셸공법’으로 지칭하는 것에 대해 그 명칭의 합리성을 접근개념 측면에서 살펴보고자 한다.

스�크리트라이닝을 최종터널 지보구조물로 적용하고자 하는 연구는 노르웨이뿐만 아니라 스위스의 MBT International Underground Construction Group에서도 수행되고 있다. 최근에 들어 일본에서는 Geofront 연구회가 발족되어 소위 싱글셸 공법에 대한 연구 자료들을 발행(2000년)한 바 있다. 상기의 두 기관이 슛크리트라이닝 지보재 시스템에 대해 정의한 내용을 옮기면 다음과 같다.

- Single-shell construction method: All static and structural requirements to be met by tunnel lining are fulfilled by a single shell element consisting of one or several layers forming a composite structure(MBT IUCG, Switzerland).

- 싱글셸이란 지보·복공부재로서 양호한 품질의 숏크리트 등이 시공되고, 복공내에 방수쉬트 등의 전단력의 전달을 방지하는 재료를 포함하지 않는, 지반과 일체화한 최종 마무리 구조의 터널을 말한다. (Geofront 연구회, Japan)

상기 두 가지의 정의는 근본적으로 동일하며 터널 지보재가 발휘하는 지지역할 기능을 중심으로 정의를 내리고 있음을 알 수 있다. 국내에서 부동의 자리를 차지하고 있는 NATM적용터널 공법은 숏크리트 라이닝과 록볼트가 영구지보재라는 적극적이고 선언적인 정의를 내리고 있지 않을 뿐만 아니라 이들의 부식예방에 대한 특별한 조치도 없기 때문에 이들을 영구지보재로 평가하는데는 현재로서는 무리라고 할 수 있다. 그러나 이 공법의 도입초기의 분위기는 굴착공동 주위의 지반은 숏크리트라이닝과 록볼트에 의해서 안정되기 때문에 그 후에 설치하는 콘크리트라이닝은 터널을 지지하는 지보재로의 기능을 발휘하기 위해서 설치한다는 개념보다는 미관 등의 사용성 측면의 기능만을 갖는 구조물로 취급하였던 것은 사실이다. 이러한 개념은 실제로 지반이 다른 지보재의 도움 없이도 스스로 안정될 수 있는 양호한 지반조건에 시공된 현행의 NATM적용 터널에서는 성립될 수 있다. 왜냐하면, 숏크리트가 사용되지 않는 채래식 터널이 콘크리트라이닝 배면에 공동을 가지고 있더라도 안정되어 있는 것은 양호한 지반의 터널의 경우는 그 안정성을 숏크리트의 지보재 역할에 의존하는 정도가 상대적으로 아주 적거나 없을 수도 있기 때문이다. 즉, NATM적용터널의 현행 숏크리트라이닝과 록볼트만으로도 터널 수명기간동안(NMT에서는 수명기간을 50년으로 간주) 터널의 안정을 유지할 수 있고 콘크리트라이닝에 부과되는 지반 하중도 발생하지 않게 될 것이기 때문이다. 바로 이러한 이유 때문에 굳이 값비싼 콘크리트라이닝을 설치할 필요가 있느냐? 라는 기술 사안이 대두되게 되었다고 볼 수 있다.

그림2에 나타난 바와 같이 NATM적용터널이나 NMT적용 터널의 경우 형태적으로 모두 더블셸 구조이다. 다만 NMT적용 터널이 두 셸간의 간격만을 더 크게 가지고 있을 뿐이다. 따라서 NATM적용 터널이라 할지라도 터널의 수명기간 동안 콘크리트라이닝이 터널을 지지하는 구조체로서의 역할을 수행하지 않는다면 그 개념상으로 NMT와 동일한 싱글셸 지지구조 형태가 되게 된다. 만약 NATM적용터널의 숏크리트라이닝과 록볼트가 부식되어 그 기능이 완전하게 상실되고 지반응력이 콘크리트에 모두 작용하는 경우를 가정해 본다면 이 경우도 콘크리트라이닝에 의한 싱글셸 지지구조 터널로 분류되어야 할 것이다.

결국 ‘싱글셸이다’, ‘더블셸이다’ 라는 정의를 내림에 있어서는 숏크리트라이닝과 콘크리트라이닝 사이에 부직포와 방수막을 설치하여 상호간 전단력을 전달할 수 없는 구조이기 때문에 더블셸로 정의한다는 것보다는 두 라이닝이 어떠한 구조적 기능을 수행하도록 규정하고 있느냐에 따라 정의가 내려졌을 때 옳바르다고 할 수 있을 것이다. 따라서 숏크리트라이닝과 콘크리트라이닝이 협력하여 터널의 안정을 성취하고 있는 NATM적용 터널이라면 이를 더블셸 구조로 보는 것은 옳바르고 타당하다. 비록 NATM적용 터널이라 할지라도 터널 수명기간동안 콘크리트라이닝의 구조적 지지기능을 전혀 필요로 하지 않는다면 이 터널 역시 싱글셸 구조 개념으로 분류함이 타당하다. 다만, NMT적용 터널에 비해 숏크리트라이닝과 내부라이닝 사이의 공간이 적을 뿐이다. 더 나아가 숏크리트라이닝과 록볼트의 내구성 및 공학적 특성을 원천적으로 확보하도록 하며 숏크리트와 록볼트에 의해서만 터널의 영구 안정을 도모한다면 이는 소위 확실한 싱글셸 구조 개념의 터널이 되게 되며, 현장타설 콘크리트라이닝보다 값싸고 가벼운 내부라이닝의 설치가 가능해 질 것이다.

## 6. 프리캐스트 세그먼트라이닝 공법적용을 위해 요구되는 국내의 기술 환경

국내의 기술자들이 노르웨이 터널공법(NMT)에 관심을 보이게 된데는 다음에 열거한 사항들 중 하나 또는 그 이상의 이유들이 복합적으로 영향을 주었을 것으로 판단된다.



- NMT적용 터널이 NATM적용터널보다 콘크리트라이닝의 유지관리 측면에서 용이 할 것이다.  
(균열 및 누수의 보수 보강 문제해결 가능)
- 따라서 프리캐스트 세그먼트라이닝이 시공성도 양호한 고품질의 내부라이닝이다.
- NATM적용 터널의 안전진단 결과를 종합해보면 대부분의 콘크리트라이닝에 발생된 균열은 지반 하중에 의한 구조적 기능에 의한 것이 아닌 것으로 판명되고 있기 때문에 현재의 막중한 현장타설 콘크리트라이닝이 과연 필요한 구조물인가? 문제만 야기시키고 있지는 않는가?
- NMT적용터널 공법은 공기를 단축하게하며 경제성도 추구할 수 있는 것으로서 국내의 지반조건에 더 적합한 우수한 공법이다.
- 가까운 일본에서도 싱글셸이란 공법이 연구되고 있지 않는가? 우리도 기술발전을 위해 이 공법을 속히 도입할 필요가 있다. 무언가 새로운 시도가 필요하다.

위에서 언급된 이외의 다른 이유들도 있을 수 있겠지만, NMT가 주목받는 이유를 두 가지로 압축하여 언급한다면, 아마도 첫째는 프리캐스트 세그먼트가 공장제작 제품으로서 현행의 콘크리트라이닝이 발생시키고 있는 유지관리상의 문제들을 말끔히 거두어 갈 수 있을 것이라는 기대감이며, 둘째로는 내부라이닝의 시공성이 좋고 공기단축도 가능하다는 이점이 기대되기 때문일 것이다. 이러한 기대치가 과연 얻어질 수 있는지 여부는 우리 기술 환경을 토대로 분석해 보아야 한다. 새롭고 진보된 기술도입은 적극적으로 권장할 만한 것이지만 합리적인 기술대책 없이 단순히 답습하는 형식의 신기술 도입은, NATM 도입 과정에서 이미 미숙함을 드러내었던 경험을 겪은 우리로서는, 당연히 반복을 피해야 할 사안이다. 이러한 견지에서 다음의 몇 가지를 음미해 볼 필요가 있다.

터널을 시공한다는 것은 미지의 세계에 도전하는 것과 같다고 할 수 있다. 이는 터널현장에는 미확인된 사항이 많이 존재하고 있음을 의미한다. NATM이나 NMT적용터널 공법에서도 공법 자체의 특성상 설계를 통해 지보량을 완벽하게 확정할 수는 없음을 인정하고 있다. 다시 말하면, 고정된 지보량(공사비)을 인정하지 않고 실제의 지반조건에 맞도록 능동적으로 변경하며 시공하는 공법들이다. 1980년대 초에 NATM을 도입할 때에도 실제적으로는 공법의 기술부분만 도입되었고 기술 외적인 계약 및 관리와 운용방법은 국내의 기존 방법을 적용하였다. 결국 공법의 원활한 적용 환경이 마련되지 않은 채 공법이 도입되어 평가와 보완 없이 급속도로 확산되었다고 할 수 있다. 이를 절반의 성공에 지나지 않았다고 평가해도 비난하지만은 못할 것이다. 따라서 NMT를 성공적으로 도입하기 위해서는 국내의 계약체계를 둔감한 고정물량제의 계약 시스템으로부터 민감한 변동물량제의 계약 시스템으로 전환하는 것이 필요하다. 아울러 우수한 기술력의 양성과 이들의 의견이 현장감 있게 반영되는 현장운용 시스템도 반드시 구비 되어야 할 것이다.

또한 숏크리트의 품질확보에 대한 우리 기술의 확립이 요구된다. 스칸디나비아 반도, 스위스, 영국, 이태리, 독일 등의 선진국에서는 숏크리트의 품질관리에 대한 연구를 오래전부터 수행해 오고 있다. 연구 지보재로서의 숏크리트라이닝의 선택은 그네들이 만들어 낸 하루아침의 작품이 아니기 때문에 이를 도입하고 시행하는 과정에서 우리가 점검해 보아야 할 기술사항과 우리 기술 환경이 이를 유연하게 받아들이는데 필요한 요소가 무엇인지를 살피고 이에 대한 적극적이고 능동적인 수용 및 보완하는 자세가 필요하다.

새로운 기술의 도입은 근시안적인 시야로부터 결정 되어서는 안 된다. 따라서 시설물의 관리주체가 새로운 기술을 도입함에 있어서 선봉의 자리를 지켜야 하며 전파하는데 있어서는 수레바퀴의 축이 되어야 한다. 터널기술분야에서도 이제는 성년의 연륜을 쌓았으므로 새로운 기술에 대해서는 최소한 도입

이전에 충분한 기술적 검증(시험시공 등을 통해)을 실시하고 우리 국내 기술상 보완하여야 할 사항들을 판단하고 적극적으로 수용하는 기술풍토를 조성하여야 할 것이다.

## 7. 결 언

프리캐스트 세그먼트 터널라이닝 공법은 노르웨이에서 적용하고 있는 방수·결빙 방지용 내부라이닝으로서 슛크리트라이닝과 록볼트를 터널의 안정을 책임지는 영구지보재로 채택하고 있다. 이 내부라이닝은 균열이 없는 라이닝이라기보다는 뚜렷하고 확실한 패턴의 균열을 보유한 조립 구조체이며, 현행의 국내 콘크리트라이닝과 같은 방법으로 보수 보강은 실시하지는 않지만 그렇다고 보수 보강으로부터 완전히 자유로운 구조물은 아니다. 세그먼트 자체, 고정볼트 및 너트, 지진영향, 접합부 등에서 국내 기술자들이 경험해보지 못한 문제점들이 내재되어 있을 수도 있으므로 이들에 대한 심도 있는 분석과 연구가 필요하다.

이 공법을 도입함에 있어서는 슛크리트와 록볼트의 품질확보에 대한 우리 기술자의 실제적인 검증과 그에 따른 경제성 등이 우선적으로 평가 되어야 한다. 무엇보다도 현장의 지반조건을 평가하고 그 지반에 적합한 지보재를 선정할 수 있는 기술 인력의 양성과 지보재량의 변경 등이 기술의 특성에 알맞게 합리적으로 수행될 수 있는 계약 시스템을 구비하여야 한다.

이 공법이 경제적이며 기술적으로 진보된 공법이라면 왜 전 세계적으로 확산되어 널리 적용하는 공법으로 보편화 되지 않고 노르웨이에서만 국한되어 적용되고 있는지 그 배경을 분석할 필요가 있다. 노르웨이는 지진 영향이 없고 터널건설 당시부터 저렴한 터널을 건설하는 풍토 속에서 기술이 발전하였음을 볼 때, 각 나라마다, 기술외적인 문화적인 측면도 공법의 선택과 발전에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 무엇보다도 새로운 공법의 도입은 구조물 관리주체가 중심이 되어 시행착오와 기술 개발 등을 시행하고 지침을 마련하여 보급하고 전파하는 기술 환경 조성이 선행되어야 할 것이다.

마지막으로, NATM적용 터널인 경우라 할지라도 콘크리트라이닝이 지지부재로서의 역할을 수행하지 않는다면 슛크리트라이닝과 내부라이닝 사이의 공간이 NMT적용 터널에 비해 협소한 싱글셸 터널이 되기 때문에 NATM적용 터널을 더블셸로 당연시 하는 것은 재검토할 필요가 있다. 또한, NMT적용 터널의 경우와 같은 내부라이닝을 적용하여야 한다면 프리캐스트 세그먼트형 보다는 가볍고 시공이 용이한 Ekeberg형의 내부라이닝 적용을 긍정적으로 검토함이 필요하다.

## 참고 문헌

- 1) Broch E., Grøv E., Davik K.I.(2002), The Inner Lining System in Norwegian Traffic Tunnel, Tunnelling and underground Space Technology 17, pp305-314
- 2) Davik K. I(1999), Cost Effective Water and Frost Protection System in Norwegian Tunnels, 3rd International Symposium on Sprayed Concrete, Norway
- 3) Dimmock R.H.(2000), Practical Solution for Permanent Sprayed Concrete Tunnel Linings, MBT Underground Construction Group, UK.
- 4) Garshol K.F(1997), Single Shell Sprayed Concrete Linings, Why and How, MBT International Underground Construction Group, Switzerland
- 5) Geofront 연구회(2000), 슛크리트 복공에 의한 Single Shell의 설계에 관한 검토 보고서, Japan
- 6) Norwegian Public Road Administration(1995), Design Guide 163
- 7) Poisel, R.(1995), Rock and Soil the Most Important Tunnel Support Elements, NATM Summer Course Lecture Note, Univ. of Technology, Vienna