

# 터널 지보기술의 역사와 NATM의 재고찰



김영근  
삼보기술단 지반부 이사

## ■ 들어가는말 - NATM에 대한 논쟁

지난 2001년 ITA 국제터널학회에서 늘 그렇듯이 여러 편의 논문발표를 듣고 있었다. 물론 영어히어링에 문제가 있어서 인지도 모르겠지만 약간은 졸립기도 하구 조금은 식상한 논문발표를 보면서 논문 프로시딩을 뒤적이고 있었다.

이윽고 나와는 오래 전에 인연을 가졌던 터라 비교적 친숙한 느낌을 가진 어느 교수의 논문발표가 시작되었다. 그는 정확한 영어발음으로 천천히 지금까지 연구한 아니 조사한 것을 하나씩 발표하기 시작하였다. 금방 장내는 술렁거렸고, 등을 비스듬히 기대고 앉아있던 청중들은 자세를 바로 하고 교수의 주장을 경청하고 있었다.

NATM은 과연 새로운 터널공법인가? 라는 문제는 수 년동안 논의되고 토론되어온 주제이다. 내가 터널을 공부 하면서 가장 많이 들었고 시험답안지에 썼고 또 출제했던 문제이기도 했다. NATM(New Austrian Tunneling Method, 새로운 오스트리아 터널공법)! 그 얼마나 멋진 말인가? 유럽의 작은 나라의 터널기술자인 Rabcewicz가 고안한 공법, 지반의 자체 지지력, 링통합구조, 숏크리트

와 록볼트, 계층 등 터널기술자라면 누구나 NATM에 대하여 참으로 할 말이 많을 것이다. 특히 TBM이나 SHIELD와는 달리 특정국가의 이름이 반영된 공법이름으로 대단히 중요한 사안이기도 했으며, 오스트리아가 터널링 기술이 대단히 앞섰던 것으로 인식하게 만들기도 했다. 역시 알프스산맥이 있어 터널링을 하면서 쌓아왔던 기술이 바로 NATM으로 결집되어 나타났을 것이라는 생각을 했다.

그러나 터널의 역사를 면밀히 살펴보면서 NATM은 전혀 새로운 공법이 아니며, NATM이 잘못된 개념에 기초한 공법이라는 사실을 주장하는 사람들이 나타나게 되었다. 그의 대표주자가 바로 스위스 공과대학의 Kovari 교수이다. 그는 NATM공법의 개념적 오류에 대한 논문을 발표하면서 NATM 추종자들과의 논쟁을 주도해 왔다. 마치 잘못된 역사적 진실에 대하여 신념을 가지고 조사하는 역사가처럼, 터널에 관한 논문, 출판서적, 특허에 대한 모든 자료를 조사하고 정리하여 자기 주장을 뒷받침하고 있다.

본 글은 이러한 조사자료에 대한 총체적인 정리물이라고 할 수 있다. 아마도 이글을 읽으면서 터널기술의 발전

이 얼마나 오래 전부터 이루어졌는지 새삼 확인할 수 있을 것이다. 그리고 많은 터널건설과 경험을 통하여 지속적으로 발전해온 터널지보기술의 역사를 하나하나 느낄 수 있으며, NATM의 탄생배경과 그 허구성에 대해서도 알 수 있을 것이다.

Kovari 교수는 1800년대 이후 터널지보기술이 발전하면서 만들어져 왔던 슛크리트 공법이 NATM이라고 하는 것이 분명히 정당화할 수 없음을 이야기하고 있다. 하지만 NATM은 이미 너무 우리에게 익숙해져 있는 것이 사실이다. 본 글을 읽고 모든 판단은 각자에게 맡기고 싶다. 그러나 역사적 진실, 그것은 덮어질 수 없는 거대한 진실이라고 할 수 있다. 실제로 역사적 사실과 다름으로 해서 우리의 실생활에는 큰 지장이 없을 수도 있다. 그러나 터널기술의 생생한 역사적 진실을 확인함으로써 지금의 우리의 모습을 돌아켜보고 앞으로의 터널기술의 발전을 생각해보고자 한다.

## 1. 서론

지반반응(ground response)이라는 용어는 지반중에 공동을 굴착함에 따라 나타나는 지반의 변형거동이라고 할 수 있다. 이러한 지반반응에 대응하여 지보를 설치하게 된다. 즉 지반굴착과 지보는 항상 터널링의 중심문제로서, 지반반응을 제어할 수 있는 방법을 통하여 굴착중 터널 안정성을 확보하고 장기간의 기능성을 보장하고자 한다. 이러한 작업을 지반반응의 조절(control of ground response)이라고 하며, 이것은 시공중 계획뿐만 아니라 기술적 측면과 경제적 측면을 고려해야만 한다.

터널공학은 굴착중에 지반의 변형과정을 이해하고, 지반거동을 예측하기 위하여 다양한 영향요소에 대한 평가와 해석에 대한 노력을 기울여 왔는데, 가장 중요한 것은 지반특성, 굴착방법(굴착단계), 그리고 적용된 지보의 방법, 형상, 범위 등이라고 할 수 있다.

터널공학의 시작은 1783년 프랑스의 1.1km 길이의 Tronquoy 터널에서 볼 수 있다. 그 당시에는 상당히 넓은 폭인 8m 터널로서 Squeezing 압박을 통과하였다. 그림 1을 보면 여러 개의 작은 갱도로부터 바닥으로부터 위까지 아치를 형성하고, 아치의 보호아래 계속적으로 코어를 제거할 수 있었는지를 알 수 있다. 그리하여 Tronquoy 터널은 공학적 원리에 기초하여 만들어진 최초의 터널로서 인식되었고, 처음으로 어려운 지반조건하에서 대단면 굴착을 실현하였다. 또한 지반반응제어의 실제적인 측면에서 좋은 예이기도 하다. 170년 후에 같은 원리로 Straight Creek 터널이 시공되기도 하였다.

지반반응제어의 역사적 발전은 기술적 관점과 과학적 관점으로 구분되는데, 기술적 사고와 과학적 사고의 상호작용과 상호재생산은 항상 동일한 관점을 유지하고 있다. 새로운 기술 개발에 종사하는 기술자는 항상 과학적 문제에 관심을 가져야 한다. 그러므로 일반적으로 새로운 이론적 통찰을 달성하는데 있어 중요한 힘은 바로 공학적 실제(engineering practice)이다.

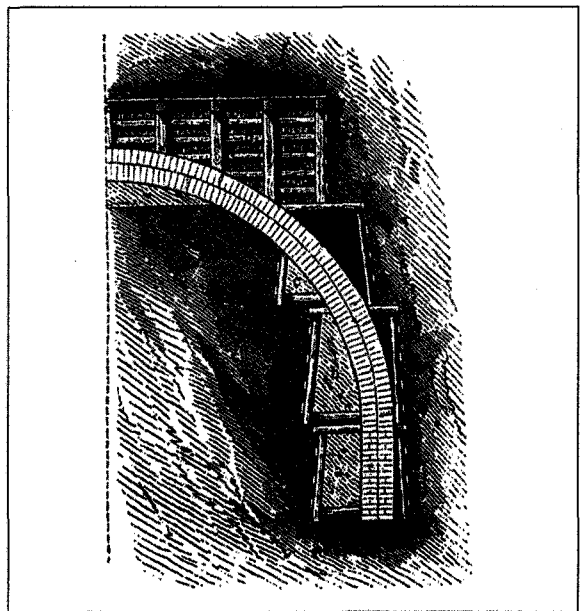


그림 1. 프랑스의 Tronquoy 터널 (1803)

19세기 초에는 단지 목재만이 임시지보로서 이용되었다. 터널은 다단굴착방법으로 굴착되었는데, 굴착은 막대한 비용(노동력)을 치른 후에 안정화될 수 있었다. 150년 후에 터널링을 살펴본다면 목재대신 라이닝세그먼트, 강재라이닝 또는 슛크리트 라이닝(Sprayed Concrete Lining, SCL method)이 사용됨을 알 수 있다. 따라서 1800년대와 1960년대 사이의 터널링의 근본기술은 변하였다. 어떻게 이러한 발전이 이루어 졌는가? 그러나 지보기술의 발전의 역사와 각각의 지보기술(목볼트, 슛크리트, 강지보)의 진화에서의 이정표는 여러 문헌에 나타나 있기는 하지만, 터널 지보방법의 구체적인 역사는 아직까지 적절한 관심이 주어지지 않고 있다.

실드기술을 살펴보면, 1825년 영국런던 테임즈강 횡단 터널에 사각형태로 적용한바 있는데, 이는 Brunel에 의해서 고안되었다. 또한 Barlow에 의해 특허화된 원형형태의 실드는 1869년 두 번째 테임즈강 터널(Tow Hill Tunnel)에 처음 적용되었고, 엔지니어인 Greathed에 의해 놀랄만한 발전을 가져왔다. 따라서 오픈실드의 근본적인 문제는 영국에서 뛰어난 엔지니어에 의해 수년간에 걸쳐 해결되었다. 이와 달리 재래식 터널방법은 점차적으로 발전하였지만 계속적이지는 못하였는데, 1940년대 말에 가서야 발전에 가속이 붙었고, 더욱 활발한 과학적 지식과 경험의 국제적 교류가 이루어졌다. 약 150년에 걸쳐 마침내 하나의 터널공법에 이르게 되었는데 이것이 SCL 공법이다.

터널링의 역사적 과정중 가장 큰 충격은 철도건설로서, 그 시작은 1830년대와 1890년대로 거슬러 올라간다. 터널이라는 말 자체는 영국에서 만들어졌는데, 철도건설의 개척자들에 의해서이다. 이것은 통(tonne arch, barrel)이라는 의미의 불어 tonnel로부터 기원한다.(현재 불어에서는 tonnelle). 오스트리아, 프랑스, 독일, 이태리, 스위스 접경지대인 알프스에서 이미 19세기 중반에 더 길고 깊은 철도터널의 필요성이 증가하였고, 사람들은 한 예로 대규모 알프스 터널을 생각했다.(이태리의 Mt. Cenis, 스

위스의 St.Gotthard 그리고 오스트리아의 Arlberg 등)

20세기 처음 십년 동안 수력발전의 시대가 시작되었고, 새로운 수력발전소가 만들어짐에 따라 수압터널, 수갱과 같은 새로운 형태의 지하구조물이 요구되었다. 전쟁으로 인한 중단을 제외하고는 이러한 활동은 1890년대까지 이어졌다. 그러나 1940년대말, 알프스지역 뿐만 아니라 전세계적으로 특히 스칸디나비아국가, 미국, 오스트리아에서 커다란 전환을 경험했다. 수력구조물의 건설은 자동차도로건설의 왕성한 활동시작기인 1950년대와 1960년대까지 건설되었다.

마침내 19세기 이후로 광산업의 꾸준한 성장이 있었고, 이것은 새로운 개발의 시작점이 되었으며, 터널공학에의 결정적인 발전을 가져왔다. 광산채굴과 터널링사이의 가장 중요한 접점은 암반압(Rock pressure)에 대한 연구와 암반지보에 대한 경제적인 방법의 개발이다. 맨처음 운하터널보다는 보다 큰 굴착과 영구터널라이닝의 설제가 요구되었는데, 터널공학의 출발점에서 보면 당연한 것이었다.

다음의 역사적 고찰로부터 가능한 우리는 과학적이고 실용적인 측면에서 개발의 근본과정과 성과들을 살펴보고자 한다. 광범위한 인용으로부터 사람들이 과학과 기술이 전개한 길을 따라 보다 나은 이해가 되도록 하고자 한다.

## 2. 과학적 발전

굴착중과 라이닝 시공중 그리고 터널 공용기간중 지반 거동의 정확한 평가는 이미 철도터널공사에서 부딪친 실제적인 문제였다. 사람들은 지반거동의 잘못된 평가 또는 지질재해로 인한 지반파괴, 목재의 붕괴 또는 과굴에 대하여 고려하였다. 따라서 현장기술자들은 지하공동의 안정성 문제를 먼저 고려하여 목재지보와 지보에 작용하는 하중을 검토하였다. 당시의 핸드북과 학회지를 보면,

이러한 문제에 대한 답을 알 수 있다. 그들은 자연과학의 방법으로부터 관찰된 현상의 원인을 연구하였다. 그러나 처음에는 정성적인 설명으로 만족하였다. 이미 Brunnel (사각실드의 개발자)은 이론적인 고찰을 시도하였다. 그의 발견의 필수항목은 그의 특허(1818)에 볼 수 있다. “터널링에 의해서 대체된 흙 이상을 즉각적으로 제거하지 마라. 즉 주변지반은 항상 자연상태의 강도와 밀도를 유지하게 하라.”

1830~60년 기간은 명확한 개념과 기술적 용어의 개발에 결정적인 시기였다. 이러한 목적으로 그들은 공학과 광산분야에서 이러한 표현을 사용했다. 주목할만한 발전은 19세기 중반까지이다. 가장 중요한 ‘지반반응’의 형태가 정의되었다. 그리하여 그들은 천단에서의 지압, 이완, Swelling 그리고 Squeezing을 분명히 구분하였다. 그 당시 터널건설에 따른 지표침하현상은 매우 일반적이었다(그림 2). 이러한 현상에 대한 정확한 메커니즘에 대한 설명이 요구되었으며, 진정한 지압의 문제는 1910년까지 해답을 기다려야 했다.

터널링에서 암반거동의 관찰과 가능성에 대한 원인분석에 관한 최초문서는 영국인인 Simms에 의해서이다. 1844년 그의 저서(터널링에 대한 최초의 교과서)에서

1.2km 길이의 Blechinglyay 철도터널(그림 3)을 건설하면서 그가 기술한 지보조건은 다음과 같다. “Blue 점토는 처음에는 미끈거리지만, 건조하게 되면 화약을 사용해야 할 정도로 단단하게 되었다. 그러나 젖은 상태로 노출되어 대기작용이 진행되면 팽창하고 부서지게 된다. Swelling은 때로는 너무 커서 이미 지보된 곳까지 위협하게 하여, 계속적인 주의와 보다 강한 목재지보를 필요로 하게 하였다. 때때로 압이 너무 커서 목재지보가 소리가 나고, 균열이 생기고 부서졌다. 그 압은 불분명하고 다양하였다. 천정부에 작용하는 가장 큰 압은 토피가 작은 경우에는 발생하였다.

Simms는 이압에서의 물의 영향, 즉 Slaking, Swelling 그리고 지압의 발전’을 경험했다. 지압은 지보를 파괴시켰고, 지속적인 관찰의 중요성이 강조되었다. 작은 토피에서의 높은 지압은 주의해야할 사항이다. “천부에서의 높은 압력은 중첩에 의해서 설명할 수 있다. 지반은 수직방향으로 작용하고 있으며, 일부만 거동하여 key로서 작용한다. 지반 자체를 지지하는 이러한 작용은 분명히 볼 수 있으며, 변형이 진행됨에 따라 침하가 발생하고 동시에 무너지게 된다. 여기서 처음으로 문제점이 제기되었다. 지압이 천정부 암반의 움직임에 의해 일으켜

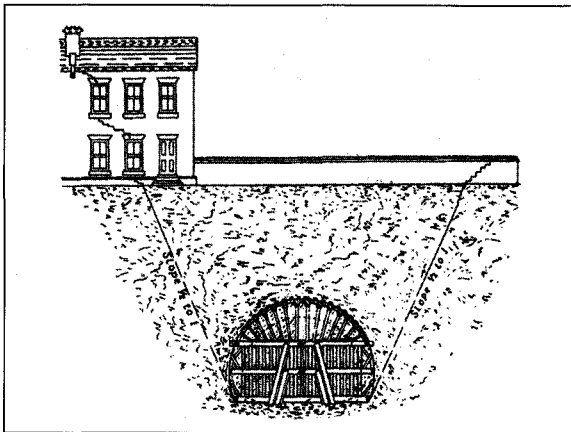


그림 2. 런던 Widening 터널에서의 지표침하문제 (1865-1867)

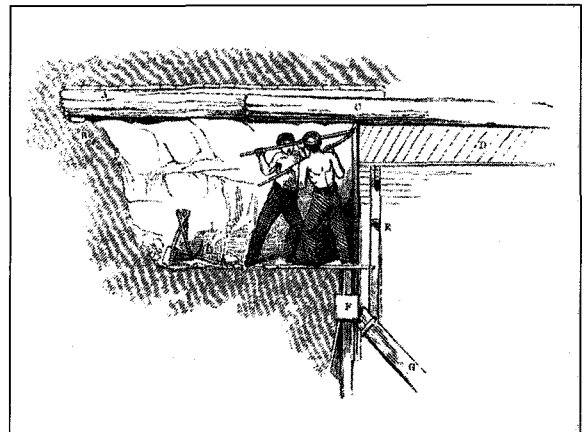


그림 3. Blechinglyay 터널에서의 상반 굴착 (Simms 1844)

진다는 것이다. 반면에 지반은 가만히 있게 되면 지반은 자체를 지지하게 되는 것이다. 이러한 공식은 지반이 구조물로서의 특징을 가진다는 것을 보여준다. 이와 관련하여 Simms는 다음과 같이 언급하였다. “굴착에 의해 교란된 후 그 자체로 평형상태를 맞추려는 지반의 움직임은 하중을 일으키고, 굴착 중 가장 약한 지점을 찾아 영향을 주게 된다. 이는 오늘날 역학의 기본적인 생각을 주는 표현으로, 굴착은 평형상태의 교란을 일으킨다는 것이다. 현장기술자로서 그는 실용적인 규칙을 고안하였고, 암반과 라이닝사이의 밀접한 관계를 실제적인 측면에서 다시 언급하였다. 지반의 이동 가능성을 막기 위하여 항상 밀접하게 유지할 필요가 있다. 이것은 분명한 것으로, 절대 굴착 후 빈 공간을 남기지 말아야 한다. 안전에 필요한 유일한 것은 먼저 지반의 변위를 막는 것이다. 이것은 적절한 위치에 약간의 지보에 의해 억제할 수 있다. 만약 이것을 적절한 시간 내에 수행하지 못하면, 암반의 약간의 이동은 종종 커다란 공동을 형성하여 위협하게 되므로 무언가로 채워져야 한다. 아치위에 빈 공간을 남기는 위험은 너무나 분명해서 어떤 표현도 필요 없다.

위에서 터널링의 기본적인 측면을 지적하게 되었다. 목재지보의 광범위한 사용은 가능한 피하여만 한다. 더욱이 1812년 Islington 터널에 대한 감독을 통해서 다음의 글을 썼다. “발주처는 과학과 실재를 커버할만한 최상의 정

보를 원한다. 그리하여 초기시작에서부터 터널공학은 과학적 훈련이 되도록 요구받았다.” 우리는 위에서 광범위하게 Simms를 인용하여 터널에 관한 과학적 지식의 시작을 확인했다.

## 2.1 Computational models (계산 모델)

19세기 중반초기에 목재지보와 영구라이닝에 작용하는 하중을 계산하려는 시도가 있었다. 모든 계산 모델은 하나의 형태를 갖는데, 즉 공동주변에서의 굴착과정을 고려하고, 가정된 파괴메커니즘 또는 지반에서의 단순한 구조적 지보메커니즘 효과에 기초한다(그림 4).

단순화된 가정은 재료에 대한 것이다. Culmann(1866)은 점착력이 없는 지반에 대하여 토압이론에 기초한 방법을 제안했다. Ritter(1879)는 이 모델을 수정해서, 터널상부에 안정적이고 자연적인 아치형성을 가정하여 수직하중으로서 재료의 무게를 고려하였다. 그는 Culmann과 유사한 방법으로 토압이론을 이용하여 수평하중을 결정하였다. Drinker(1888)는 “균질한 무한체에 공동을 만들 경우, 입자들은 점착마찰에 의한 저항력에 의해서 서로 움직이며, 평형곡선이 공동의 위에 나타날 가능성이 항상 있다.” Engesser(1882)는 공동위의 지반아치(ground arch)의 형성에 의해 비점착지반에서의 지보효과를 설명

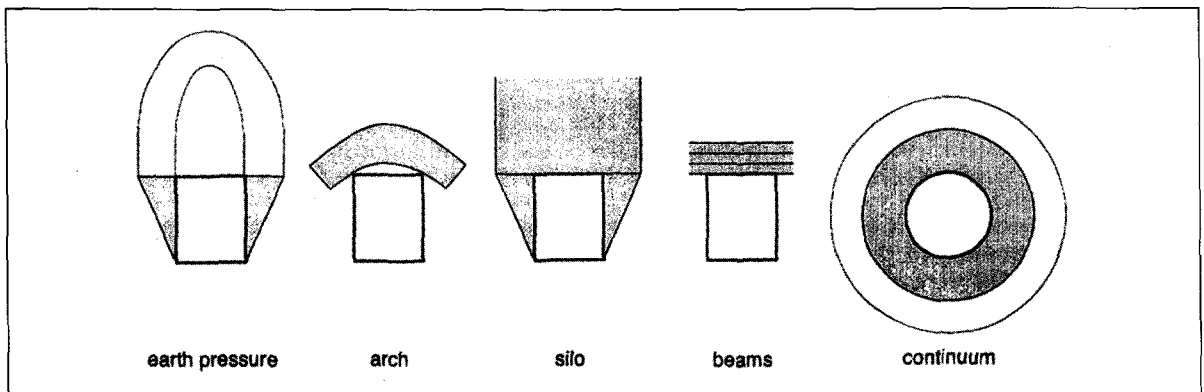


그림 4. 1920년대까지의 계산모델들

하였다. 하중은 지반아치와 라이닝사이에 있는 매스의 무게로서 정의하였다. Janssen(1895)은 천정부에서의 비점착재료의 Silo효과를 제안하였다. Fayol(1885)는 층상암반의 경우 빔체의 구조작용에 의해 암반에서의 과정을 설명하였다. 지반에서의 메커니즘에 대한 설명은 그림 5와 같다. 이러한 모델들은 핵심아이디어를 가진다. 그것은 어떤 조건하에서 적용가능하며, 유용성이 있다. 이러한 모델들은 대체로 암반변형(공동방향으로 변위)이 발생함을 가정한다. Silo이론을 제외하고는 다른 모델들은 천단침하가 증가함에 따라 지압이 증가한다는 결론에 이른다. 따라서 이들은 초기에 언급과 Simms의 중첩에 대한 이론적 증명을 제공한다. 이러한 기본적 사고에 기초하여, 수많은 변수들이 개발되었다(Komerall 1912, Bierbaumer 1913).

이러한 계산모델이 서로 모순되고, 관찰과도 모순됨은 분명했다. 다시 말하면, 심각한 결함을 가지고 있는 것이다. 지압에 대한 터널깊이의 영향에 관한 문제, 인버트 아치에 대한 압력의 형성, 그리고 Squeezing 현상은 아직 미해결로 남아있었다. 터널에서 하부히빙과 인버트에 작용하는 압력에 대한 이유중의 하나는 초기단계에 점토에서의 Swelling에 의해 설명될 수 있다. 그러나 Squeezing 현상에 대한 설명은 찾을 수 없다. 다음으로

터널링에서 이론적으로 가장 복잡한 문제중의 하나인 Squeezing 현상에 대하여 이야기 하고자 한다.

Squeezing 현상을 설명하려는 최초의 이론적 작업은 20km길이의 Simplon 터널의 건설과 연관된다. 그것은 최대 2100m 심도를 갖는다. Simplon 터널(I)은 1898~1906년에 건설되었고, Simplon 터널(II)은 1912~1921에 건설되었다. 두 번째 터널에서 긴 시간이 걸린 것은 전쟁의 영향이었다. 알프스 지질학자인 Heim은 대심도에서 엄청난 어려움이 나타날 것임을 경고했다. 그는 “각각의 암석에서 기둥이 너무 높아, 그 무게는 암석의 강도를 초과해서 기둥바닥이 부서진다. 암석강도에 따라 이런 기둥은 높아지거나 낮아지지만 관찰조건은 항상 일어난다.”라고 주장하였다. Heim은 암석강도를 단축압축강도로 이해했고, 그는 이런 강도에 도달할 것으로 믿었다. 정수압조건이 지배하고 이것을 잠재적 소성(latent plasticity)이라고 했다. 또한 어떤 임계깊이를 넘어서(암종에 따라 다르지만) 터널작업은 기술적으로 조절하기가 불가능하다. 1912년 Wiesmann(Simplon 터널의 주감독)은 Heim의 추론해서 오류를 찾아냈다. 첫 번째 터널주위의 암반거동의 단축이 아닌 삼축조건으로 ‘폐쇄된 매스의 내구성은 암석강도에 지배된다’ 그는 이미 1905년에 대리석에 대한 삼축압축실험결과를 자문했다. 두 번째 소성

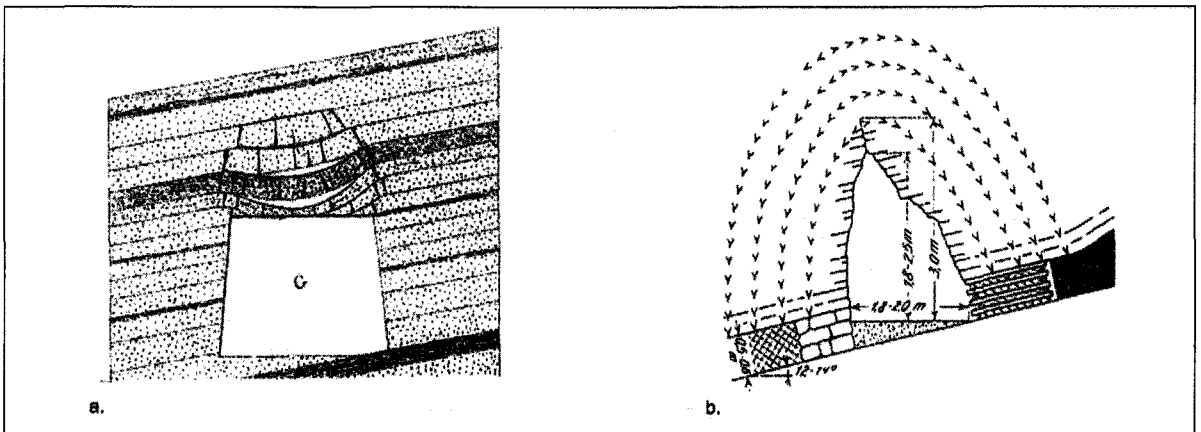


그림 5. a. 층상암반의 천단부 파괴메커니즘(Fayol 1885) b. 과굴암반에서의 자연적인 지반아치의 모습(Luthgen 1929)

상태에서의 암석거동은 유체와 비교할 수 없다. 점성유체에서 정수압상태에 도달하는 것은 단지 시간의 문제이다. 그러나 내부마찰에 의한 압축은 전혀 다르게 거동한다. 크리프나 이완과정은 소멸되고, 점착력과 내부마찰에 의해 응력상태의 차이(주응력의 차 : 터널주위의 암반에서 축대칭조건에서 접선응력과 반경방향 응력 차)에 의한 공동에서의 응력 재분배의 중요성을 인식하였다.(그림 6a). 응력 재분배에 의해 영향받는 암반대를 'Protective Zone' 이라 했다. Wiesmann은 Squeezing 암반에서의 터널링 경험에 기초하여 삼축실험과 구멍을 가진 탄성판에서의 응력조건을 찾아서 정성적인 방법을 주장하여 지압과 변형사이의 관계에 대한 명확한 이유를 인식하고 제 공하였다. 암반이 움직임이 수mm로 작아짐에 따라 라이닝에 작용하는 하중은 감소하게 되는 것이다.

구멍을 가진 판체에서 응력 재분배를 설명하는 해석모델은 파괴기준을 고려해서 교량기술자인 Mailart(1923)에 의해서이다. 그는 1923년에 Protective Zone 개념을 고려하였다. 사실 이것은 상당한 과학적인 진전을 의미하는 것으로, 소성과 탄성존을 구분하여, 암반은 삼축강도 한계까지 응력을 받고 더 이상 지탱할 수 없을 경우, Maillart로부터 생산적인 공식을 얻을 수 있다. "외부 지

반에 견딜 수 있는 라이닝을 시공하려면, 암반의 강도가 증가되고 그 자체로 지보할 수 있다." Mohr(1957)는 Squeezing 암반과 라이닝 상호작용을 지반반응곡선과 라이닝 특성을 이용하여 결정할 수 있음을 보였다. 국제적으로 널리 확립된 이론적인 개발은 소위 특성선 방법(Characteristic line method)으로 불렸으며, 그것은 지압의 정량적인 평가를 가능하게 하였다. 특성선하에서 공동경계에서의 반경방향의 변위와 거기에 작용하는 저항력사이에 함수관계를 이해하였다. 따라서 특성선은 축대칭하에서 이론적으로 제한된다. 이것은 원형단면과 재료 특성(등방성, 균질성), 초기응력상태(정수압 조건)와 라이닝 저항에 적용할 수 있다.

1956년 Mohr는 "라이닝에 작용하는 힘은 암반이 작게 움직일수록 작아질 것이다. 이러한 사실의 실제적인 사용은 암반이 스스로 지보할 수 있게되는 정도로 지보될 수 있어야함을 필요로 한다."

## 2.2 관찰과 계측

터널기술자들이 제반문제에 대한 해답을 찾기 위해 과학의 방법을 적용하려 했기 때문에 관찰과 계측을 강조한

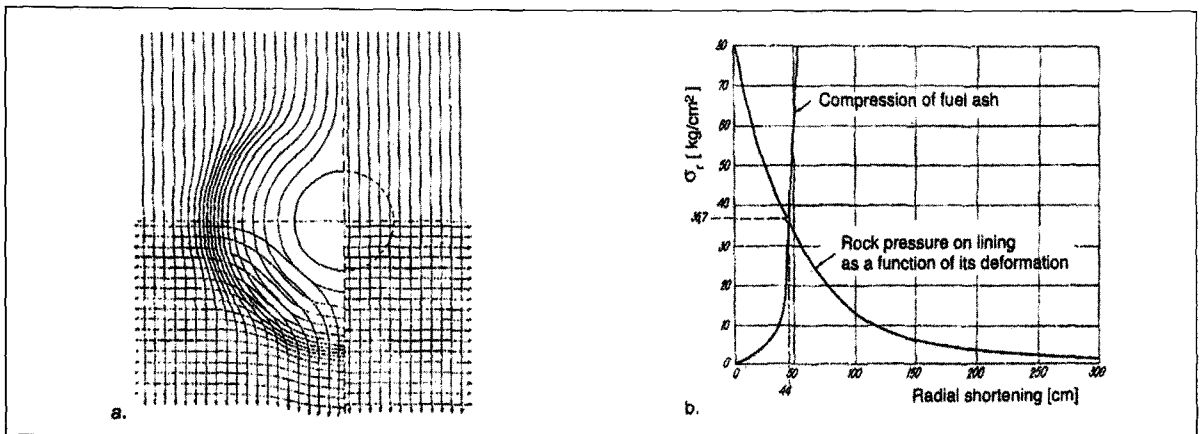


그림 6. a. 깊은터널에서의 굴착전후의 응력상태(Wiesmann 1912)  
b. 지반반응곡선과 라이닝특성에 대한 표현(Mohr 1957)

것은 놀랄 일이 아니다. 초기에 체계적인 변형계측이 터널에서 수행되었고, 목재지보의 거동으로부터 지반의 거동을 인식하였다. 한 예로서 1920년에 Wiesmann의 저서에서 1920년대 이후로 현장계측은 터널에서 중요하게

되었으며, 시험터널에서 계측은 자주 수행되었다. 시험터널에 관한 보고서에서 New Croton 도스터널에서 1950년대 이후 터널기술자들은 암반변형과 지압에 대한 관찰을 위해 수많은 계측기술을 사용하였다. 광산 또한 중요한 기여를 했으며, 터널링에 관한 표준시방서에 계측에 대한 사항을 언급하였다.(그림 7b) 불완전하기는 하지만 과학적 개발을 위한 수많은 실험실 모델이 지하공동주위에 지반 변형메카니즘을 규명하기 위하여 수행되었다. 층상암반거동에 관한 Fayol (1885)와 Engesser(1882)의 실험이 수행되었다.

### 3. 지보기술의 발전

재래식 터널공법은 1950년대까지 목재에 의한 것이었다. 이후 점차적으로 철재지보가 이용되고, 슛크리트와 앵커가 사용되었다. 마침내 이러한 지보공의 체계적인 조합이 광범위하게 도입되었다. 이러한 지보기술의 발전에 대한 적절한 이해가 필요하며, 목재지보의 단점은 다음과 같다(그림 8).

- 목재지보를 설치하는데 필요한 시간과 노동력
- 굴착방해와 불필요한 작업으로 큰기계를 사용하는 굴착작업지연
- 목재지보로 인한 과굴착
- 안정적이고 견고한 시스템 설치의 어려움
- 영구라이닝용 아치 건설동안 작업장의 복잡
- 지질적으로 공동이 있는 경우 적절한 지보의 제한성
- 나무가 썩음에 따라 내구성 저하
- 화재 위험 / 많은 나무의 소비

따라서 1814년 Simms가 가능한 목재의 사용을 적게 하라고 충고한 것은 별로 놀랄 일이 아니다. 또한 다른 지보방법으로의 대체가 요구되었다. 이러한 지보의 첫 번째가 철재다. 더욱이 Rziha(1867)은 실질적으로 목재의 필

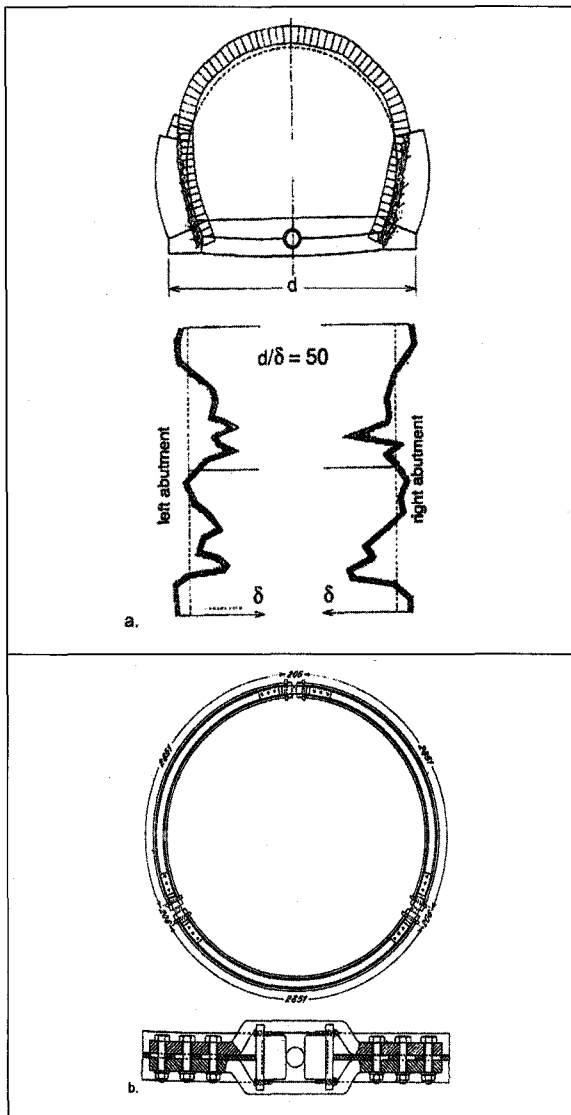


그림 7. a. 인버트 아치의 필요여부를 확인하기 위한 내공 변위측정 (Wiesmann 1920)  
b. 지압을 측정하기 위한 압력셀(Gremmler 1933)



요성이 감소되었고, 철재를 사용하므로써 터널에서의 안정성이 증가하였다. 그러나 사전설계의 형태로 일반적으로 적용되지 않았다. 진정한 지보방법은 새로운 지보공에 의해서 제공되었는데 이것이 철재지보, 슛크리트 그리고 볼팅이다.

이런 관점에서 터널공사는 광산 쪽에 많이 의존하게 되었는데, 새로운 발전에 대한 조건들은 특히 세 가지 이유로 더욱 그렇다. 새로운 사고와 기술은 철도터널보다는 작은 터널에서 쉽게 적용되었고, 더욱이 길이는 터널보다 광산갱도가 더 길다. 따라서 광산은 여러 해 동안 연속성을 제공하고 새로운 방법에 대한 시험조건을 제공한다. 이와는 달리 터널은 과학적 사고에 기초하여 개발작업을 수행하였고, 새로운 지보기술이 개발되었는데 이것이 SCL 공법이다.

목재가 초기에 다른 지보로 쉽게 포기되지 않았는가는 혁신에 대한 보수적인 자세가 우세하고, 경제적인 관점이 결정적이었다. 목재지보에 필요한 노동력은 싼지만, 철재와 시멘트 가격은 오랫동안 비쌌다. 광산활동이 대규모 기계장비사용으로 크게 증가했을 때가 목재지보를 포기하게 되었다.

### 3.1 강재지보(Steel Supports)

목재대신 처음으로 철재지보의 사용은 명확치 않다. 아마도 오래된 철도레일이었을 것이다. 철재지보에 대한 맨 처음의 자극은 19세기 중반에 제철소가 만들어지면서이다(그림 9).

1896년 문헌에 의하면 목재대신 철재의 사용은 지난 수 년동안 터널 또는 지하공동의 지보로서 많은 굴착에 큰 성공을 가져왔으며, 보다 큰 레일이 사용되었다. 각각의 조각을 서로 고정하기 위해 나사이음루프를 사용하고 압박과 철재사이의 공간은 돌로 채웠다. 다른 보고서에서 (1863~67)는 철재지보를 사용하여 quick sand를 극복하였는데, 강재링을 사용하여 단순하게 원형을 유지했다. Prahler는 squeezing 압박에서의 목재대신 철재지보의 이점을 상세히 적고 있다. “계속적인 변위와 침하로 바닥과 천정에 지보가 필요하다. 이것은 목재에 변형을 유발하여 부서져 보수가 필요하였다. 모든 방향에서의 압력과 변위를 제어하기 위해 타원형이 선정되었는데, 대부분의 경우에 이러한 조건하에서 철재지보가 저렴하다. 19세기 말에 강재지보를 사용시 기본적인 문제가 해결되었다.(Fayol 1885, Mathet 1888, K hler 1900).



그림 8. Lötschberg 터널에서의 목재지보(1908~1913)

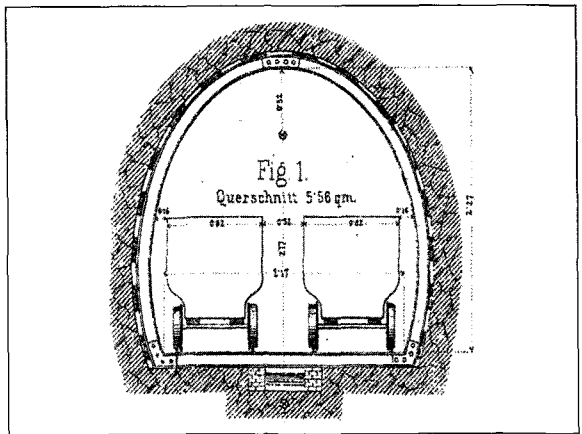


그림 9. 철재지보와 목재레그에 의한 임시지보

터널링에서 강제지보의 초기적용에 대한 예는 유명한 Simplon 터널의 압력대(pressure zone)이다. 그것은 터널링 역사에서 최악의 경우였다.(Sandström 1963) 2.5×2.8m의 사각철재프레임이 상반굴착에 사용되었다. 프레임은 하나씩 설치되었고, 길이방향으로 철재빔이 연결되었다(그림 10). 철재빔의 비틀림과 버클링을 방지하기 위하여 두꺼운 목재가 그사이에 설치되었다. 어떤 단면에서는 이러한 보강도 충분하지 않았고, 붕괴되기도 하였다. 마침내 압력대는 두께 2.5m의 인버트와 1.7m 두께의 아치로 해결되었다. 터널기술자인 Pressel은 1960년에 다음과 같이 보고하였다. 1905년 말까지 최소한의 변형이 나타날 때까지 일정한 간격으로 계속이 수행되었다.

1932년에 미끄럼 연결부를 가진 Toussaint-

Heintzmann지보가 개발되었고(그림 11), 강제지보의 설계나 시공에서 중대한 발전이었다. 연결루프의 설계는 일정한 라이닝저항력을 가져 큰 내공변위에 저항할 수 있는 지보타입을 가능하게 하였다. 이것은 squeezing 암반에서 지압이 내공변위가 증가함에 따라 감소하도록 하는 산업적으로 생산된 첫 번째 지보였다.

### 3.2 슛크리트 라이닝(Shotcrete Lining)

슛크리트 기술의 발전은 미국인 Akeley에 의해 cement-gun의 발명으로 시작되었다. 그는 1911년에 ‘소성 또는 고착물질 혼합장치’로 특허를 획득했다. 많은 발명을 통하여 기술발전을 이룩한 수많은 기술자중에서 독

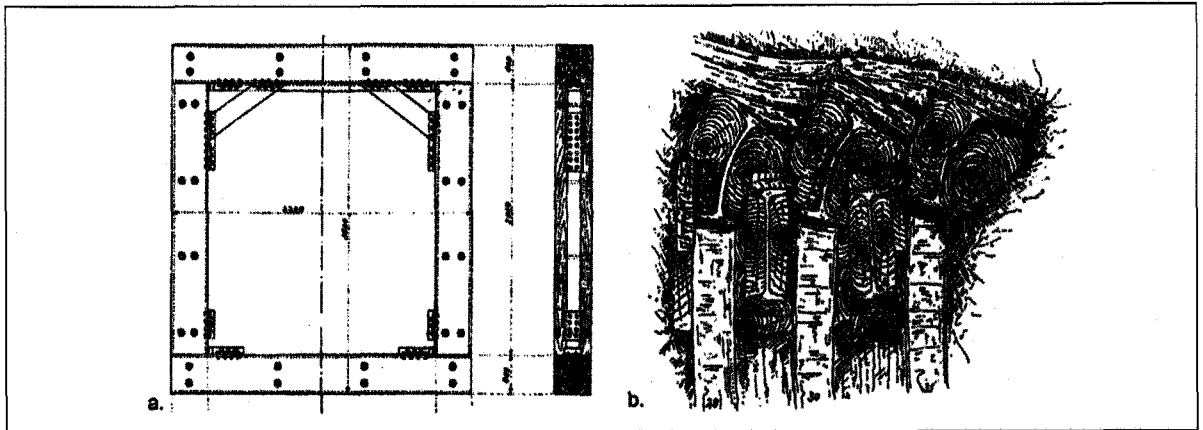


그림 10. Simplon 터널 a. 사각철재 프레임 b. 붕괴된 철재프레임(1906)

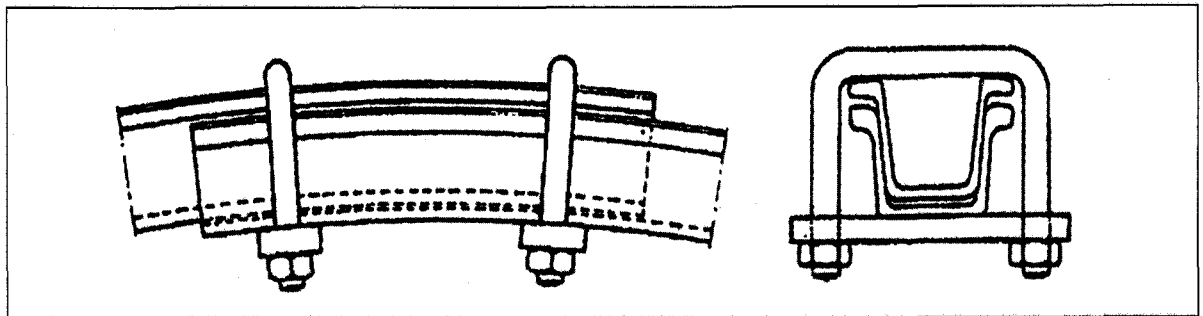


그림 11. Toussaint-Heintzmann의 미끄럼 연결부(Frohlich 1948)

일인 Weber, 스위스의 Senn, 독일인 Jstam을 들 수 있다. 이러한 스프레이 모르타르는 Gunit이라고 불렸고 후에 Torkret 이라 했으며, 1937년이후 Shotcrete 라고 했다.

1914년에 미광무국은 Bruceton 시험광산에서 목재를 숏크리트로 대체하기 시작했다. "Cement-gun 방법은 이점이 많아 mine gun이 구입되었다. 모래와 시멘트 혼합물이 모든 균열과 틈에 압석과 구분할 수 없을 정도로 쏟아졌다. 그리고 gunit에 보강용 와이어 메쉬를 사용할 필요가 있다. 더욱이 얼마나 안전한지는 목재에 비교해서 완만하고 단단한 라이닝이며, 얇은 코팅은 목재지보의 비용을 절감한다. 1920년 Knox와 Potter의 보고서에서 1500m 깊이의 광산운반갱도에서 2.7km정도 gunit가 사용되었으며, 이완된 지반을 지보하기 위하여 목재의 한 틀을 이용하는 것이 아니라 전체적으로 지보한다. 이런 조건하에서 gunit의 사용은 대단한 것이다. "수천피트의 광산들은 목재대신 gunit가 필요하다. 이것은 상대적으로 값싸고, 내화성이 있고, 쉽게 보수가능하며 효과적이다."

숏크리트공법(Shotcrete method)이라는 용어는 1920년대에 처음 사용되었다. 숏크리트의 적용가능성이 기술 분야에 빠르게 인식되고 이용되었다. 터널과 수갱건설에서의 처음적용은 1920년전에 수행되었다. 이방법을 이용하여 Illinois에 보강용 gunit 셸만 있는 무라이닝 철도 터널이 만들어졌다. Schulter와 Hilgard(1920)는 이러한 새로운 기술에 대하여 처음으로 유럽에 보고하였다. 이 기간동안 두 개의 수로터널에서 보강숏크리트가 사용되었다. 또한 오래된 철도터널에서 보강작업으로 숏크리트가 사용되었다. 독일 Heimbach 발전소 수로터널에서 1922년 처음으로 Shotcrete로 라이닝이 실시되었다. 이것은 굴착되면서 숏크리트할 수 있는 분명한 장점이다. 스프레이 숏크리트가 빨리 암반에 부착된후에 발파작업이 시작된다. 그러나 굳어진 층은 발파중에 파손되었다. 일부구간에서 숏크리트층은 암반면으로부터 떨어졌다. 관련기사는 다음과 같다. "새로운 터널공법이 발전소 건

설을 더욱 빠르고 경제적으로 건설할 수 있게 되었다." 이것이 SCL과 관련된 공법으로 사용된 첫 번째이다.

터널건설에서 숏크리트가 어떻게 작용하는지에 대한 다양한 가설들이 초기에 나타났다.(Tubben 1923) "이에 대한 설명은 의외로 간단하다. 보강 콘크리트가 단단하고 견고한 매스로 구성되지만, 숏크리트는 어느 정도 탄성을 가진 매우 얇은 Skin을 가진다. 이것은 단단한 것보다 분명히 높은 하중에 잘 견딘다."

1925년에 숏크리트 적용에 대하여 두 개의 글이 발표되었다.(Szilard 1925, Meyer 1925). Meyer는 숏크리팅에 대하여 지압을 견디거나, 적어도 Rock fall을 막을 수 있으며, squeezing 암반에 밀착한 완전 링구조인 콘크리트 라이닝이 보고되었다(숏크리트를 가진 인버트의 형성). 따라서 Meyer는 목재나 철재지보대신 암반면에 밀착되고 보강된 숏크리트 셸을 사용할 수 있다고 보고했다.

1920년대에 숏크리트의 광범위한 사용을 설명하기 위해 'Neue Zurcher Zeitung'에 실린 기사를 인용한다. 헤드라인에 '숏크리트 공법(1926) 특히 터널건설시 이 공법은 충분히 검증되었다. 터널라이닝은 일반적으로 두 개의 링으로 구성된다. 콘크리트 링과 내부보강링. 암반에 밀착된 숏크리트/메쉬보강으로 경제적 그리고 작용상의 증진을 가져왔다.



그림 12. 스위스 쥘리히 Ulmberg 터널에서의 숏크리팅(1927)

스위스기업 Prader AG는 몇개 국가에서 gunite를 수행하였다. 예를 들어 1926년 Sevilla에서의 수압터널, 프랑스에서의 수로터널 그리고 인도에서의 수압터널 등. 또한 북미대륙에서의 발전을 살펴보면, 암반면의 guniting은 몇 년 동안 표준시공이었다. 광산에서의 이러한 적용은 지반이완을 완전히 해결하였는데, 아치 지보효과와 콘크리트전단강도는 상당하다. guniting에 의한 목재지보의 대체는 경도의 단면적을 상당히 줄일 수 있다. 이 경우에서의 뚜렷한 특징은 록볼트와 와이어메쉬 그리고 gunite를 같이 적용한 것이다. guniting은 1930년대 이래로 광산에서 표준지보가 되었다.

캘리포니아 수로터널(45.8 km)에서 "변형하는 지반의 어려움은 과도한 유지관리를 필요로 하고, 몇 배의 목재지보가 요구된다. 이런 조건을 극복하기 위하여 스프레이

콘크리트(gunite)의 원형라이닝이 시도되었다. 이런 기술의 사용은 대단히 성공적이며, 재굴착, 추가지보 그리고 유지관리의 감소는 이러한 라이닝이 목재지보를 대체할 수 있음을 보여준다. 이 방법은 이제 구체화되었고 성공적으로 수행되었다.(1933)

유럽에서 쏿크리트기술이 어느 정도 수준에 도달한 것은 1920년대인데, Mersey 터널의 예에서 볼 수 있다. 직경 13.4m의 터널은 그 당시 가장 큰 도로터널이었는데, 일정한 두께의 쏿크리트층에 의해서 건설되었다. 쏿크리트 총길이는 4.2 km로 거의 70,000m<sup>2</sup> 이다. 또한 1943년에 "Handbook on Cement Gun Work"이 발간되었다. 이후 2차 세계대전이후 더욱 많은 쏿크리트의 발전이 있었다.

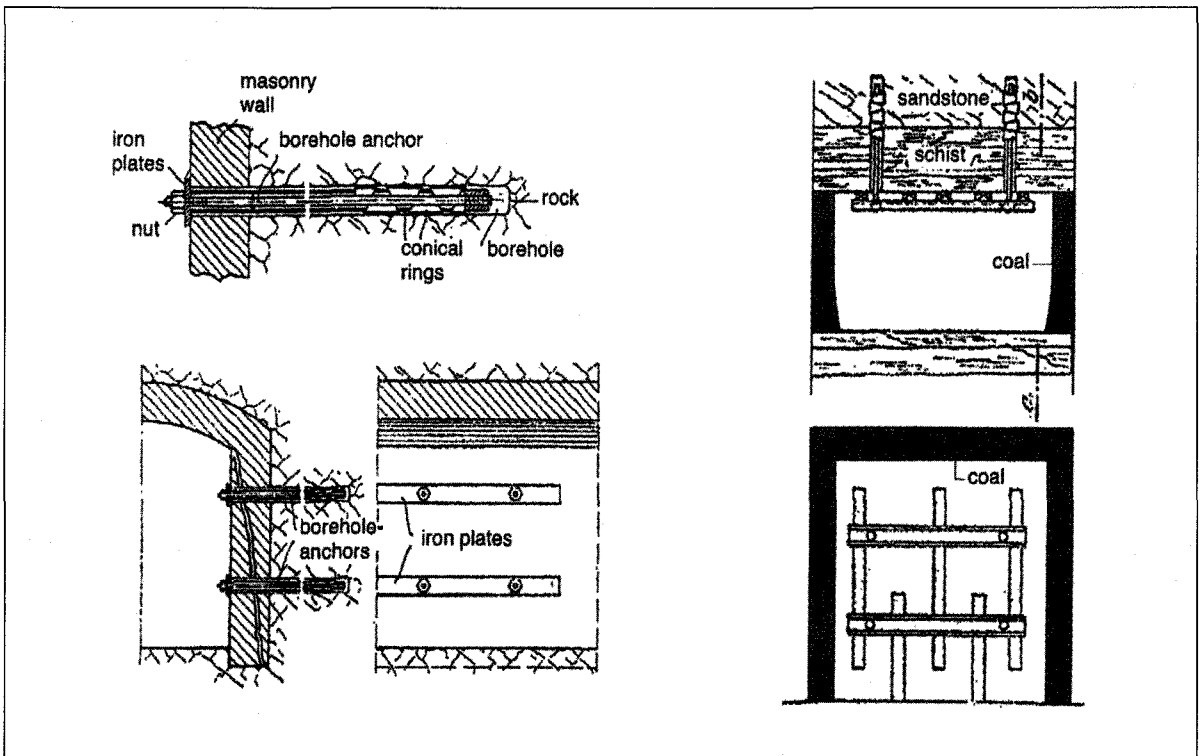


그림 13. 처음 적용된 것으로 알려진 록볼트(1913)

### 3.3 록볼트(Rock Bolt)

록볼트의 역사는 Stephan 등에 의해 획득된 특허명세서(No.302909)로 시작되었다(그림. 13). 특허명은 '터널링에서 바닥으로부터의 지보없이 천정부와 측벽부의 지보방법'으로, 본 발명은 지반중에 고정점을 가지는 지보로서 암반중에 철재로 만들어진 로드, 튜브, 케이블로 충분한 깊이로 삽입하고 적당한 방법으로 끝에 고정하거나 전체길이를 따라 부착하게 하는 것이다.

1차 세계대전으로 인해 1918년까지 특허에 대한 주장은 연기되었으며, 특허저작권자나 특허번호가 기술서적에 보이지 않았다. 그러나 1919년 독일서적에서 짧게 언급되었다. 주제는 '철재앵커를 이용한 터널지보'였으며, 지난 수년동안 시험용 철재앵커는 지압에 저항하는데 목재 대신 사용되었으며, 이제 더 이상 레그나 스트럿이 사용되지 않고 썩기 쉬운 목재는 폐기되었다. 즉 볼트가 좁은 굴착층 붕락에 대한 보호로 천정부나 벽면부에 사용되었다. 4년간의 시험기간동안 앵커로 지지된 단면은 신선하지만 목재지보구간은 썩어서 무너졌다.

이러한 혁명적인 발명은 불행히도 망각속으로 사라졌고, 일반적으로 사용되지 못하였다. 앵커에 대한 첫 번째

발표는 25년후인 1941년에 미국의 Weigel에 의해서이다. 그는 1936과 1937년 수행된 시험으로부터 새로운 시스템은 '아치선 아래의 지반을 지보하고, 그것을 상부암반에 앵커링하는 것이다. 이것은 암반이 이완되기 전에 수행된다. 지반붕락은 항상 점진적인 작용이므로 만약 아래층이 구속되고 단단히 묶인다면 윗층은 문제를 일으키지 않게 되는 것이다. 그리하여 연속성을 띤 얇은 층은 충분한 강도를 갖는 하나의 두꺼운 빔체로 된다.' (그림 14).

1945년에 독일기술자 Beyl은 1942년과 1943년에 수행된 성공적인 시험결과를 보고했다. 변위계측으로 앵커링에 의한 지반변형의 영향을 연구하여 prestressing 효과와 암반이 노출된 후 가능한 빨리 앵커링을 할 필요가 있음을 보고하였다. Beyl은 그 당시 유럽에서 성공하지는 못했지만, 그 후 1950년대 앵커링 사용을 촉진하는데 도움이 되었다.

1943~1950년 기간에, 미국광산에서 록볼트가 급격히 사용되었다. 이러한 발전은 1948년 Conway사와 미광무국(USBM)의 발표 후에 시작되었다. Conway사는 록볼트의 원리에 대하여 기술하였다. 이 방법은 언뜻 보기에 구두징을 박는 것과 같았고 사람들은 이것을 Sky hook 이라고 불렀다. 천장은 분명히 그 자체로 지보되었다.

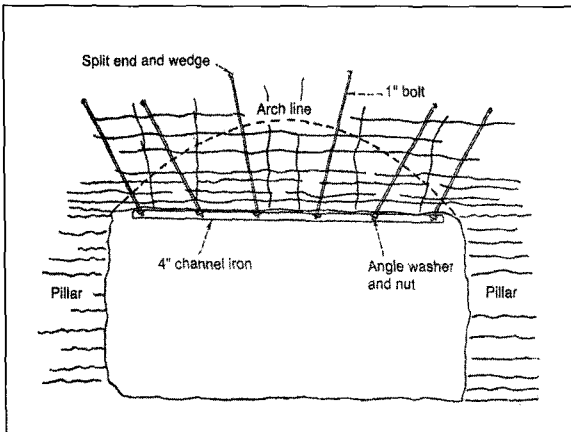


그림 14. 천정부에 적용된 긴 록볼트(Weigel 1943)

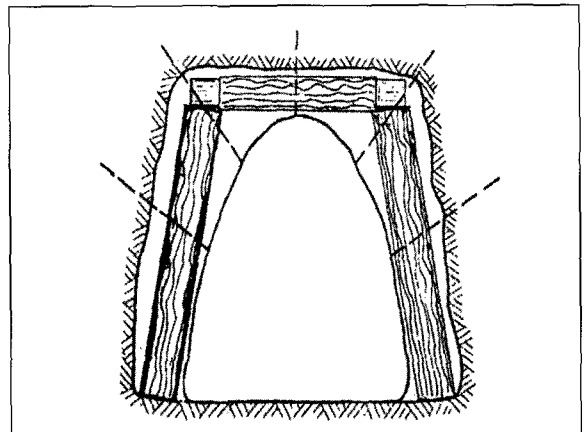


그림 15. 목재지보단면과 록볼트 지보단면의 비교 (Pollish & Breckenridge 1954)

매우 짧은 기간에 미국에서의 록볼트의 성공은 통계적으로 확인할 수 있다. 1948~1950년에 350개의 광산의 총1400km의 터널에서 앵커가 사용되었다. 1949년에 광산에서 천정볼팅에 의해 안전기록을 달성할 수 있었는데, 낙반에 의한 사고를 감소시켰다.

1950년대에 미국에서 앵커의 급격한 사용을 설명하기 위해서 두 가지만 예를 들어도 충분하다. 미국에서 1953년초에 월 5천만개, 1957년에는 월 3백만개의 앵커가 사용되었다. 원시동굴시대이후로 목재는 지하공간을 유지하는데 사용되어 왔다. 록볼팅뒤에 숨겨진 일반적인 원리는 지반자체를 지보구조의 한부분이 됨에 틀림이 없다. 영국, 프랑스, 독일에서의 앵커사용의 증가는 1950~1952년 사이로서 유사한 성공이 있었다. 불과 몇 년 사이에 유럽에서 목재지보가 사라지게 된 것이다. 앵커링은 연구대상이 되었다. 1950년대 이후에 앵커에 관한 실험실/현장연구 그리고 교과서, 기술표준에 관한 많은 관련 서적을 볼 수 있다. 철재라이닝이나 분사 콘크리트에 비해 앵커는 광산분야에서 오래 전에 사용되었다.

터널건설은 광산분야의 빠른 발전에 의해서 영향 받았다. 미국에서 시스템 록볼트의 첫 번째 적용은 Keyhole 댐의 수로터널에서였다. 발파후 과굴을 막기위해서 천정볼팅이 사용되었고 균열형성을 막았다. 말굽모양의 터널이 록볼트에 의해 빠르게 지보되었다. 천정볼트의 위치는 거의 터널십장의 경험적인 판단에 의해서였다. 터널에서 낙반으로부터 막장인부를 보호하기 위한 강지보와 레깅 또는 목재버텃보의 비싼 시스템은 사라지게 되었다. 국제적인 규모로의 발전을 보여주기 위하여 16km Notalbe 수로터널의 시공을 살펴보자. 여기서 세일과 사암이 수평층으로 분포하고 있다. 강재아치는 록볼트에 의해 대체되었다. 이방법은 매우 경제적이다. 터널링에서 시스템 록볼트의 획기적인 발전은 42km의 Delaware 수로터널에서이다. 강아치의 단점으로 인하여 천정볼팅방법이 요구되었다. 또한 강재루프타이가 적용되었다. 볼팅후에 가능한 빨리 guniting이 이루어 졌다. 이 방법으로 목재지보

는 필요 없게 되었고 재래적인 강재지보가 들어듬에 따라 철제사용량의 85%가 감소하게 되었다. 또한 19.5km에 걸친 록볼팅으로 낙반에 대한 사고가 거의 없게 되었다. 록볼팅은 강지보보다 더 밀접하게 적용되었고, 이것은 작업인부를 보호할 수 있는 시간을 주었다(그림.16). 지보메카니즘에 대하여 목재지보는 시공후 파괴가 일어난 후에 작용하게 되고, 록볼트는 암반이 그 자체로 지보하게 기여한다.(Miller 1952)

이러한 대규모 프로젝트에서 달성된 높은 굴진율, 경이적인 안전기록 그리고 경제적 성공은 전세계적으로 터널 산업에 엄청난 영향을 끼쳤다. 그래서 광산분야에서 얻어진 경험과 함께 New York 수로터널은 대규모 프로젝트에 광범위한 록볼트의 사용을 가져오게 되었다. 1952~1953년에 Kemano 수력발전소가 건설되었다. 암반은 화강섬록암이고 4.5m 길이의 볼트가 판상절리를 고정하기 위하여 사용되었다.(Woodruff 1954)

1952~1953년 스웨덴의 Harspranget 발전소건설에서 체계화된 볼팅과 건너이팅이 급속하게 적용되었다. 가



그림 16. East Delaware 터널에서의 천정지보로 설치된 록볼트(Weiss 1952)

장 먼저 그라우팅된 앵커가 적용되었는데 이를 Swedish 방법이라고 하기도 한다. (1953 Heggstad). 1952년 스웨덴 사람인 F.Lidingo와 A.Lundqvist에 의해 완전히 그라우트된 Perfo-bolt 가 발명되었는데(특허번호 1462256), 이것은 록볼팅에서의 혁신적인 발전을 의미한다. Rabcewicz는 1957년에 다음과 같이 썼다. “이러한 기술의 엄청난 발전은 스웨덴에서 이루어졌다. 대규모 사업에 의한 환경으로 가능하게 되었으며 긴 연속성이 있었다. 더욱이 연구와 실험의 풍부한 원천은 항상 이용 가능하였는데, 한 예로서 Harspranget 수력발전소에서 그라우트 볼트와 torket에 의해서만 지보되었다.

노르웨이에서는 1950년대 초에 많은 지하발전소를 건설하였다. Heggstad(1956)에 천정볼트의 도입은 발전소의 굴착을 상당히 단순화시켰다. 시멘트 그라우트 볼트와 보강된 건나이트의 사용되었다. 프랑스에서는 11.7km길이의 Isere-Arc 수로터널이 건설되었는데 최대토피가 2000m로서 1949년에 굴착이 시작되었지만 록버스트로 인해 어려움을 겪었고, 1951년부터 시스템 록볼팅이 문제를 해결하였다. 록볼팅방법 덕분에 전면굴착이 적용될 수 있었고, 굴진율이 두배로 증가하였다. 이러한 기술의 도입은 모든기술자들을 놀라게 했다. 프랑스 기술자 J.T.

Talobre는 공동주위에 지반아치를 가정하여 연약한 암반에서의 시스템 록볼팅 효과를 설명하기 위한 하나의 모델을 제안하였다(그림 17). Talobre는 1940년대에 암석역학 (rock mechanics)이란 단어를 도입했고, 그는 암석역학 교육의 창조자로서 인식되었다.

길이 11.6km, 최대토피 2200m의 몽블랑 도로터널에서 1958~1962년사에 프랑스와 이탈리아에 건설되었다. 스퀴징과 록버스트는 시스템 록볼팅에 의해 제어되었다. 이러한 기술로 어려운 지질조건에도 불구하고 전단면굴착이 적용되었다. 2년 동안 72000개의 록볼트가 사용되었다. Irese-Arc터널에서의 훌륭한 경험에 기초해서 암반지보로서 시스템 록볼팅이 1954에 이미 도입되기로 결정되었다.

Snowy Mountain 수력발전계획은 20세기 가장 큰 토목프로젝트중의 하나였다. 6m폭의 총연장 145km 터널이 건설되었는데 이미 1949년 계획에 록볼트가 포함되어 있었다. 1955년에 공사가 시작되었는데, 지하발전소의 대규모굴착에 록볼트의 성공적인 사용되었다. 빠른 터널링을 위해서는 터널굴진과 동시에 록볼트가 시공되는 것이 바람직한데, 강지보의 설치는 작업공정을 방해한다. 단지 스퀴징암반에서만 강지보가 필요하다. 이 프로젝트의 특

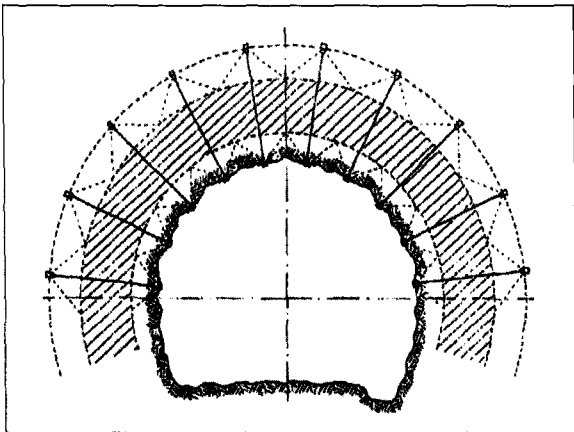


그림 17. 록볼트에 의한 Ground support arch (Talobre 1957)

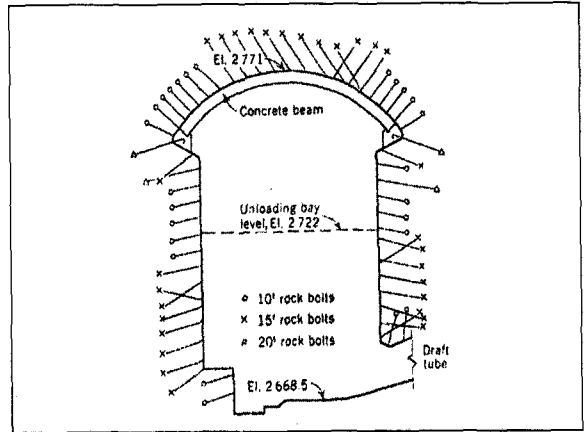


그림 18. Snowy Mountain 터널에서의 록볼트

징은 대형 Tamut I 장비에 의한 시스템 록볼팅이다. 록볼트는 임시용과 영구용으로 사용되었다(그림 18). 록볼팅 메카니즘에 대한 보다 과학적인 원리가 필요하였다.

T.A. Lang는 이러한 목적으로부터 일련의 연구를 시작하였으며, 수많은 뛰어난 과학적인 논문을 발표하였으며, 가장 유명한 것은 “록볼트의 이론과 실제(Theory and Practice of Rock Bolting)” 이다. 그는 다음과 같이 결론지었다. “록볼트 사용의 시작과 발전에 있어서 미국 광업의 기여가 대단히 크다고 할 수 있다. 1999년 Snowy Mountain 50주년 기념 심포지엄에서 Enderbee는 다음과 같이 주장하였다. “Snowy Mountain 공사는 경암에서의 터널기술에 중대한 변화를 가져왔다.” 오스트리아 광산에서의 록볼트에 대한 첫 번째 실험은 1955년 Salach 탄광에서 수행되었다.

#### 4. 지보요소의 결합적용

우리는 시스템 록볼팅과 건나이팅이 이미 1930년대 이후 몇 개 국가에서 조합해서 적용하고 있음을 보았다. 처음으로 진정한 슛크리트 타설장비를 도입한 것은 1950년에 스위스 기술자 G. Senn으로(최대골재크기 25mm, 3m/h의 효율 그리고 다른 개선사항 등) 슛크리트 방법의 신기원을 이루었는데, 초기 경우보다 슛크리트 라이닝이 지반반응을 제어하는데 있어 더욱 중요한 역할을 한다는 것을 인식하게 되었다. 많은 수의 수력발전용 수로터널의 필요성 그리고 중앙유럽의 교통터널은 이런 관점의 확산을 가져다 주었다. 슛크리트는 록볼트나 강지보가 초기에 했던 것보다 더욱 높은 중요성으로 인식되었다. 곧바로 많은 경우에 있어 이러한 지보요소들의 조합 지반반응을 조절하는데 있어 가장 효과적이라는 점과 가장 경제적인 해답이라는 점을 인식하게 되었다.

스�크리트 타설장비의 새로운 형태는 1952년에 스위스의 Verbano 수로터널에서 대규모로 적용되었다. 현지 엔

지니어에 따르면 “스�크리트는 연약한 암반에 즉각적인 지보로서 목재대신에 성공적으로 적용되었다. 건나이팅과 슛크리트의 효과는 암반면상의 개구절리를 채울 수 있으며, 이러한 방법으로 암반블록의 움직임을 초기에 막을 수 있었다. 또한 강지보사이의 틈을 채워 2차 아치를 형성하고, 슛크리트라이닝은 그 자체로 현장타설 콘크리트 대신 최종라이닝으로 사용될 수 있음을 보였다.

1956년 Frey-Bar 발표에서 슛크리트의 새로운 형식을 주장하면서 그 중요성을 밝혔다. “록볼트와 슛크리트의 결합은 지보의 훌륭한 수단이다. 슛크리트는 몇 가지 장점을 갖는데 암반면에 면적이나 두께 등에 적용성이 매우 좋고, 막장에 지장을 주지 않기 때문에 굴진율이 증가하게 된다. 더욱이 슛크리트 라이닝이 암반암이 작용하게 되는 시점에 즉시 타설된다. 각각의 지보에 대한 공사비를 비교하면서 각각의 다른 요소(록볼트, 슛크리트, 강지보)가 서로 결합될 수 있음을 명심해야 한다”.

1964년에 오스트리아 기술자 Rabcewicz는 “불안정한 지반에서 굴진과정의 전체적인 과정으로서의 목재나 철제지보의 임시지보대신 슛크리트에 의한 암반면의 안정화의 맨처음의 성공적인 적용은 1951~1955년 스위스에서 Lodano-Mosogno 터널에서이다(그림 20). 그러나

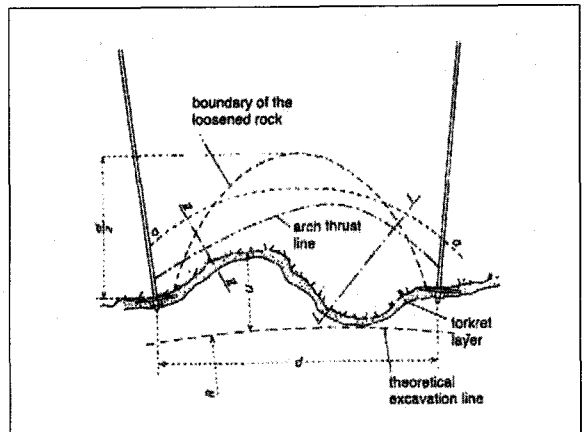


그림 19. 록볼트사이의 슛크리트층의 효과 (Sonderegger 1955)



이것은 물론 사실이 아니다. Rabcewicz는 단지 숏크리트의 중요성만을 보여줬다.

오스트리아에서 Senn의 숏크리트 타설장비(그 당시 스위스 ALIVA에 의해 공급)는 1953~1954년에 Prutz-Imst 수력발전소에서 처음으로 적용되었다. 오스트리아

광산에서는 1957년 ALIVA 장비를 처음으로 적용하였다. 이태리에서 1958년에 16.2km의 Monastero 수압터널에서 Senn 장비를 이용하여 강제격자지보와 조합된 숏크리트를 시공하였다(그림 21). 이것과 관련하여 '터널시공의 새로운 시스템(New System of Tunnel Construction)'

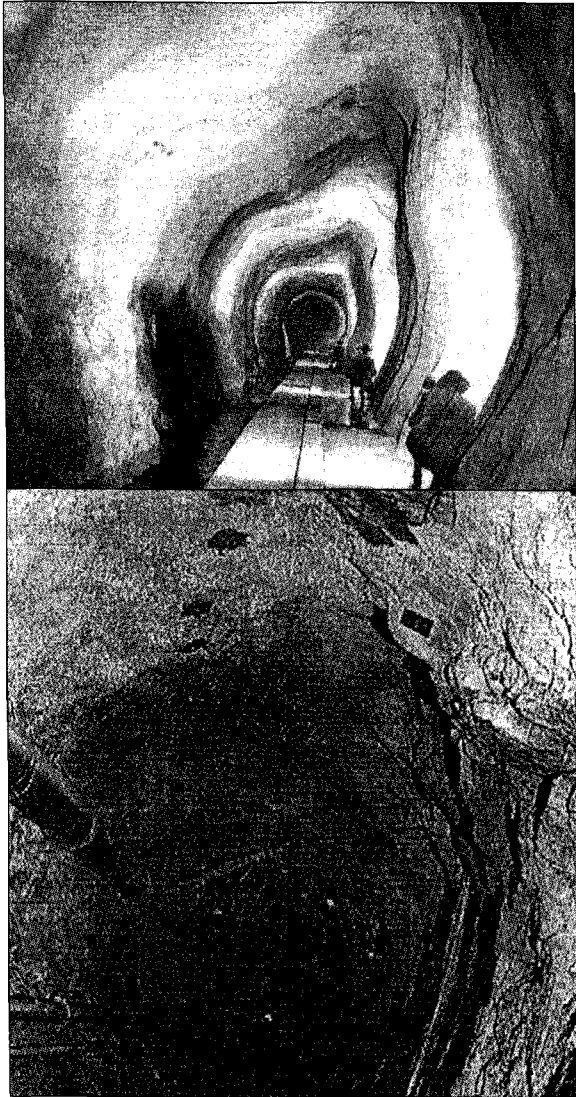


그림 20. 스위스 Maggia 수로터널에서의 숏크리트와 록볼트의 적용(1952~1955)

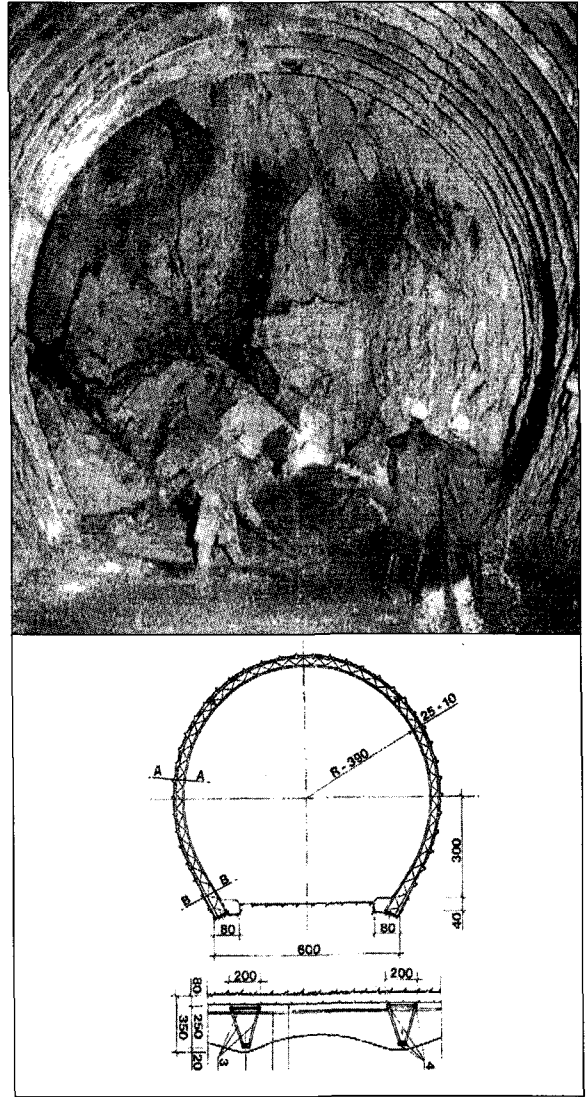


그림 21. 이태리 Monastero 터널에서 숏크리트와 격자지보의 사용(1958)

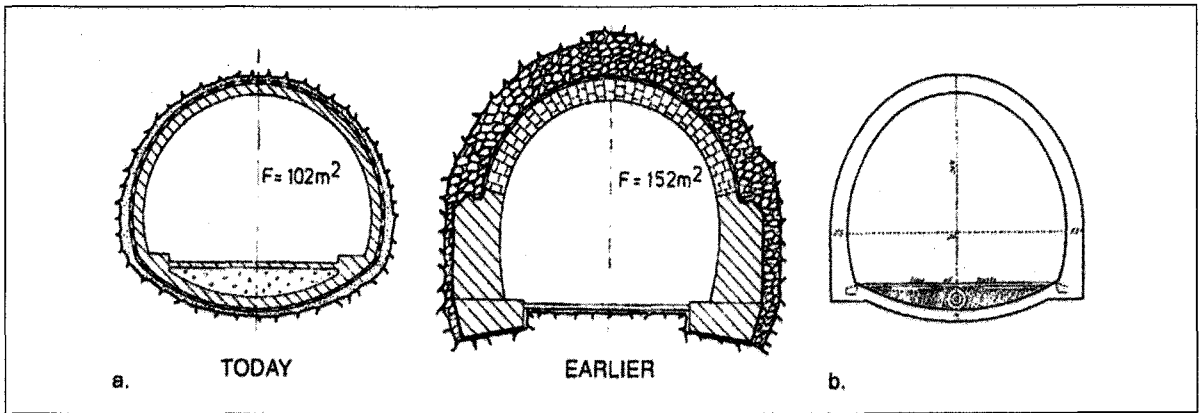


그림 22. a. NATM의 10번째 원리 : 임시지보와 영구 라이닝(Muller & Fecker 1978)  
 b. Brunel의 터널 : 런던 Great Westren 철도터널(1836)

이라는 출판물에서 체계적인 변형측정이 수행되었음을 보고하였다.

돌이켜보면, 1960년대까지 숏크리트에 대한 기술적 수단과 과학적 배경은 잘 확립되었으며, 빠르게 목재지보를 대체하였다. 숏크리트 공법은 독일어권 국가(오스트리아, 독일, 스위스)에서 폭넓게 사용되었다. 유사한 표현이 다른 언어로 사용되기도 하였다.

1963년에 Rabcewicz는 논문에서 ‘숏크리트 공법을 NATM(New Austrian Tunnelling Method)이라 명하고 숏크리트와 록볼트공법은 오스트리아에서 개발되었고 시험되었다’ 라고 발표하였다. 심지어 Rabcewicz는 공법기원의 국적으로 인해 공법을 NATM으로 명백히 칭하였다. 후에 NATM은 광범위하게 사용되었다. 여전히 오늘날까지 NATM은 오스트리안 코드에 의해 다음과 같이 정의되어 있다. “지반지보를 제공하기 위하여 스프레이 콘크리트를 사용하고 종종 적당한 지반앵커, 볼트, 다우엘을 사용하면서 터널내에 라이닝을 만들면서 막장을 굴착하는 기술”(HSE 보고, 1996)

대부분의 문헌에서 두 개의 중요한 주장은 친 Rabcewicz와 다른 NATM 주창자에 의해 만들어 졌다. 첫 번째가 목재지보의 대체, 두 번째가 얇은 터널라이닝

의 적용이다. “이것은 완전히 개척적인 것이고, 얇은 스프레이 콘크리트를 무거운 목재나 두꺼운 콘크리트 라이닝 대신 사용하는 것은 엄청난 용기를 필요로 한다. 그러므로 이런 개념을 정당하게 NATM이라 부른다.(Poisel and Engelke 1994). 여기서 우리는 전세계적으로 모든 터널링의 역사에서 목재지보를 버리는 과정에 있었다는 것을 언급하였다. 한 예로서 1913년 O'Rourke의 논문 “암반터널에서의 목재지보의 제거”에서 그는 “터널링에서 목재의 필요성을 줄이거나 없애는 것만큼 중요한 것은 없다고 하였다. 또 다른 상시적인 주장으로 NATM으로 인해 터널라이닝이 얇게되고 인버트에 의해 링구조가 되었다는 것이 있다. 우리는 10번째 NATM의 원리(그림 22a)를 설명하는 한 예를 고려해보자. 초기(earlier)에 지반조건에 관계없이 무거운 지보가 이루어졌지만 오늘날(today)은 얇은 임시지보와 영구지보가 이루어진다. 여기서 오늘날은 NATM 터널을, 초기는 Pre-NATM의 터널링을 말한다. 그러나 얇은 라이닝과 인버트의 특징을 보여주는 터널단면의 예는 1836년 Brunel에 의해 설계된 유명한 Box 터널에서 볼 수 있다.

터널링의 역사에 대한 그러한 왜곡은 ITA의 오스트리아 그룹에 의해 1978년에 이슈화된 NATM에 관한 공식

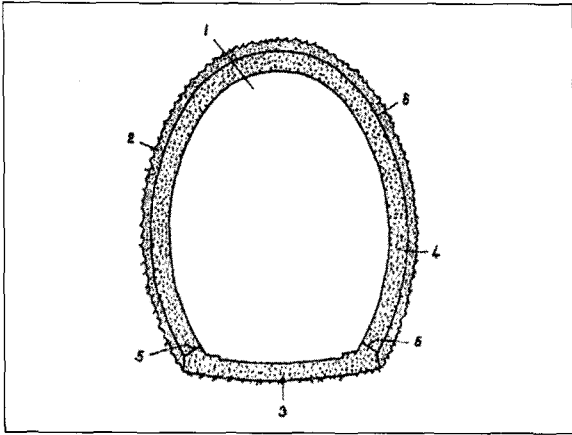


그림 23. Rabcewicz의 NATM 특허 (1948)

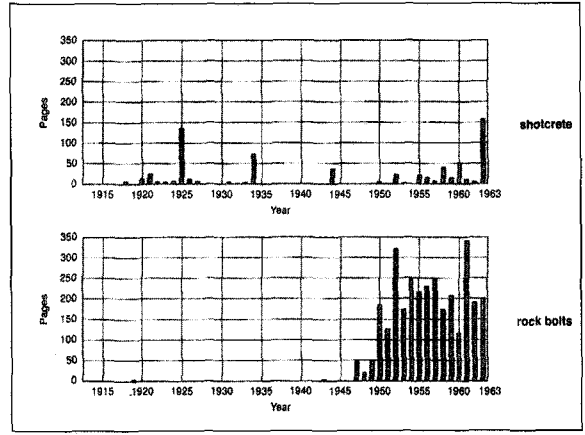


그림 24. 1963년까지의 슛크리트와 록볼트 관련 발간물의 논문수

적인 문서에서 찾을 수 있다(10개 국어로 된 NATM의 정의와 원리).

가장 빈번하게 사용된 문서를 통해서 슛크리트 공법을 NATM으로 명명하는 것을 정당화하고 있다.

- Rabcewicz는 1948년에 NATM을 고안하고 특허를 냈다.
- Rabcewicz는 터널링에 록볼트와 슛크리트를 도입했다.
- Brunner는 1955년에 NATM을 고안하고 특허를 냈다.
- Muller와 Pacher는 NATM의 아버지로서 인식되었다.
- NATM으로 지반은 그 자체로 지지된다.

이러한 주장은 근거가 없다.

Rabcewicz의 특허(지하공동(터널)에서의 라이닝에 대한 절차)는 1949년에 단지 즉시 링으로 폐합되어 연결된 콘크리트 라이닝에 대해서만 다루고 있다. 그는 암반압의 진행을 확인하기 위하여 변형측정을 제안했으며, 그림 23에서 보듯이 아주 Stiff한 라이닝으로 인해 전혀 실제적인 수단이 아님을 보여준다. 또한 NATM이 관찰공법 (observational method)이라는 주장은 이러한 잘못된 개념에서 비롯된다. 그 특허는 이미 1952년에 Rabcewicz에 의해 철회되었다. 그의 특허에는 록볼트나 슛크리트에 대한 언급이 전혀 없다.

그럼에도 불구하고 그는 NATM은 그의 특허발명이라고 주장한다. 또한 NATM 역사가들은 후에 확인한다. “그는 남미에서 1948년에 NATM을 고안했다. 심지어 그의 박사논문에서 (Rabcewicz 1950), 그는 그 당시 지보 기술에서의 새로운 발전을 모르고 있음을 보여주고 있다. 그는 여전히 주지보로서 30cm 두께의 콘크리트 라이닝만을 다루고 있었다. 1950년대 초 스위스회사 SENTAB와 관계하는 동안 그는 록볼트를 알게되었다. 뉴욕의 Delaware 도수터널에서 록볼트를, 브라질의 수력발전 암반챔버에 guniting을 적용하였다. 그의 록볼트에 관한 첫 번째 논문은 1953년에 다른 두 저자와 공동으로 쓰여진 것이었다. 1957년에 Rabcewicz는 점착력이 없는 재료에서 록볼트에 대한 실내실험에 대하여 보고하였으며, 슛크리트와 록볼트 적용에 대한 그의 첫 번째 논문은 1961년에 나타났다. 위에서 언급했듯이 이러한 논문으로부터 1963년에 그는 슛크리트공법을 NATM이라고 새로 명명했다.

우리는 그들의 발명이후에 가능한 한 전세계적으로 록볼트와 슛크리트의 발전과 적용에 관한 논문을 모았다. 매년 발간된 논문수는 그림 24에 나타내었다. 사람들은 슛크리트에 대한 계속성을 알 수 있다. 그러나 록볼트의

경우에 1910년의 발명은 1940년대까지 알지 못했다. 그러나 그 이후에 폭발적인 관심과 발전이 있었다. NATM이라는 용어가 1963년에 도입당시까지지만 해도 NATM주창자들의 관련논문을 거의 볼 수 없었다.

Brunner는 1955년에 오스트리아와 독일에서 특허(스퀴징 암반에서의 터널건설공법)를 제출했으며, 1956년에 발표되었다. 당시 Brunner는 이탈리아에 있는 Serra Ripoli 터널과 관련되어 있었다. 후에 Brunner발명의 중요성은 NATM 주창자들에 의해서 강조되었는데, "NATM은 1958년 Brunner에 의해 고안되었으며 세계적

으로 사용되었다." 그는 터널링에서 다중굴착방법을 제안하였으며, 스킨링 암반에서 록볼트나 철재지보의 사용없이 얇은 슛크리트 라이닝에 의해서 충분히 지보가 가능하다고 생각했다.(그림 25) Brunner는 몇 개의 터널에서 Senn의 장비를 사용하면서 십장으로서 일했다. 그는 터널링에서 슛크리트 사용에 대한 유일한 권리를 주장했다. 그러나 그의 특허는 곧바로 공격을 받았고 법원의 결정에 의해서 1966년 독일에서 그리고 1967년 오스트리아에서 그의 특허는 취소되었다. 두 개의 NATM특허에 의해 NATM은 전단면(full face)과 연속적인(sequential) 굴착방법으로 정의된다.

1968년까지 Pacher는 록볼트와 슛크리트에 대한 어떤 논문도 발표하지 않았다. 1964년에 제안한 지반반응곡선으로 NATM의 아버지로서의 명성을 얻을 수 있었다. NATM문헌에 있는 많은 보고서에서 지압을 최소화하는 지반반응곡선의 성공적인 적용을 다루고 있다. 그러나 그의 개념은 기본적인 에너지 보존의 법칙을 위배하는 동시에 영구적인 운동을 한다고 하므로서 그 자체가 잘못된 것이다. 그러나 NATM 주창자들은 오늘날 여전히 Pacher의 잘못된 가정을 방어하고 있다. "그것은 합리적이다. 비록 아직까지 계측이나 수치해석에 의해 증명할 수 없지만"

또한 Muller는 마침내 NATM과 보조를 맞추었다. 22개의 NATM 원리로 재래식 터널링의 과학과 기술을 보잘 것 없는 것으로 만드는 것이 그의 생각이었다. 그들이 맞는다고 해도 체계적인 설명은 국제적인 터널링의 과학적 전승으로부터 빌려온 것으로 다른것들이 NATM 이념을 대표하여고 한다. 여섯 번째 NATM의 원리를 생각해보자. "라이닝을 너무 일찍 혹은 너무 늦게, 그리고 너무 강하지 않고 너무 유연하지 않게 시공하라"(Muller and Fecker 1978). 다시말하면, Muller는 우리에게 경고한다 "원리로부터의 조금의 오차는 작업인부와 구조물의 안전에 매우 해로울 수 있다" 그리고 "NATM으로서 지반자체가 지보한다"라는 핵심 논점은 1844년에 Simms의 설명

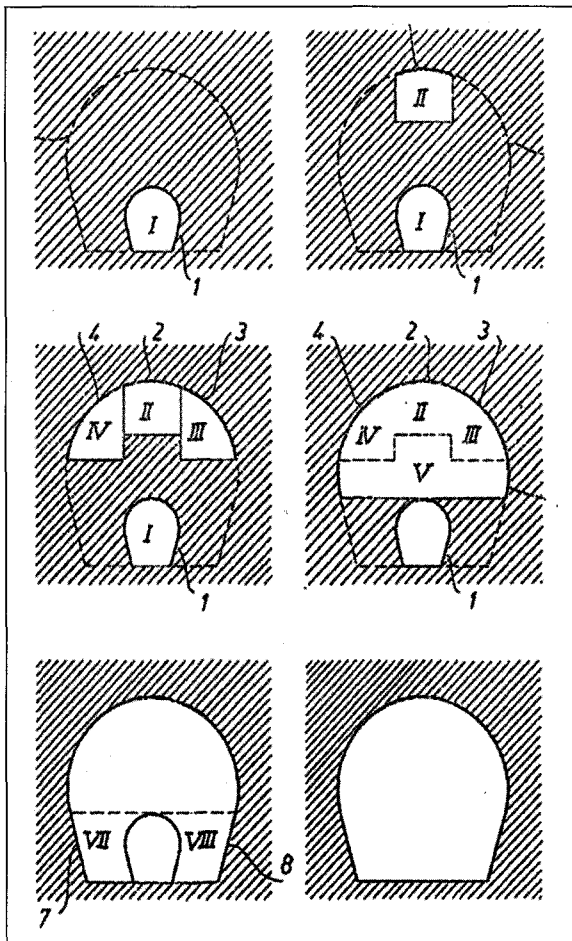


그림 25. Brunner의 NATM 특허(1955)

을 언급할 필요가 있다.

## 5. 결론

목재이외의 다른 수단에 의해 지반반응을 제어하는데 있어 첫 번째 중요한 단계는 19세기초에 지보기술의 발명이었다. 오늘날 터널링의 재래적 방법의 완전한 개발은 1950년대 중반까지 나타나지 않았다. 이 방법의 과학적 근거는 19세기까지 거슬러 올라가지만, 록볼트와 슛크리트는 1910년대에 처음 적용되기 시작하였다. 본 글은 록볼트와 슛크리트 개발에 관한 흥미로운 이야기를 추적하고, 소위 NATM과 관련하여 구성하였다.

오랜세월을 거치면서 슛크리트와 앵커공법은 잘 확립되어왔다. 오늘날 흙이나 암반중 터널, 수갱, 지하공동 등에서의 재래식 시공법은 일반적으로 앵커 또는 강제아치를 가지거나 없는 슛크리트를 임시지보로서 사용한다. 슛크리트 공법은 1920년대부터 기술문헌에 적용되어 왔으며, 1996년에 영국토목학회에서 발간된 가이드라인에서 다음과 같이 결론지었는데, “터널에서 스프레이 콘크리트지보의 사용은 종종 NATM으로서 잘못 언급되는데, 이러한 혼동을 피하기 위하여 본 가이드는 스프레이 콘크리트 라이닝(Sprayed Concrete Lining, SCL)이라는 표현을 사용할 것이다.” 이에 반대할 사람은 없을 것이다. 이러한 선택은 NATM 학문체계의 사이비 과학적 특성으로부터 나온 것이다. 이것은 Kovari에 의해 1994년에 증명되었다. 또한 본 논문에서는 NATM은 표절이라는 것을 보였다. 사이비과학과 표절은 동전의 양면과도 같으며, 지적인 완전함이 부족하기 때문에 발생한다. 1800년대 이후 국제터널사회의 엄청난고 계속적인 노력의 결과 지반반응을 이해하였고, 목재지보를 대신하여 적절한 지보, 즉 슛크리트, 록볼트 그리고 강제아치를 개발하였다. 따라서 슛크리트공법의 또 다른 이름이 NATM이라고 하는 것은 분명히 정당화될 수 없다.

## ■ 맺음말 - 터널기술에 대한 역사적 고찰

우리는 이 글에서 한 학자의 집요하고도 고집스러운 학문적 열정을 확인할 수 있다. 마치 오래된 역사적 사료를 하나씩 찾고 정리하고 분석하여 잘못 인식된 역사적 오류를 바로 잡게는 역사가처럼 지난 18세기 이후의 터널기술의 역사적 발전에 대한 치밀한 분석을 현재 모든 국가에서 널리 통용되고 있는 NATM공법이 얼마나 잘못되었는가를 역사적 거울을 통하여 보여주고 있다.

NATM이 사이비 과학이며 표절이라는 극단적인 용어를 사용하는 것은 아마도 오랜세월동안 현장에서 그리고 연구실에서 터널기술의 발전을 위해 그리고 어려운 터널공사를 성공적으로 끝내기 위해 고생하고 노력했던 전세계 터널기술자들에 대한 숭고한 경배로 받아들여지며, 일부 사람들의 재빠른 선점으로 인해 모든 터널기술자들의 역사적 산물이 결코 그들만의 것이 될 수 없음에 대한 적절한 외침이라고 생각한다.

이 글을 읽으면서 아마도 여러분들은 몰랐던 많은 사실을 알게되었을 것이다. 18세기 후반부터 시작된 터널링에 대한 과학적 노력, 19세기 초부터 철도와 광산을 통해 이루어진 터널기술, 1950년대에 시작된 특허분쟁과 NATM 주창자들의 허구성 등등. 터널기술은 한순간 우연히 개발되는 것이 아니라 꾸준한 역사적 결실이라고 생각한다. 과학적이고 이론적인 근거를 바탕으로 수많은 실험과 연구를 통해 달구어지고 수년동안의 현장적용을 통하여 현장기술자들로부터 검증과정을 통하여 비로써 체계적인 공법이 이루어지고 공용화된 틀이 만들어진다고 할 수 있는 것이다.

어느 역사가는 “역사는 현대 사회의 모습을 투영하고 있는 역사가와 과거 사실 사이의 상호 작용, 또는 대화이다. 라고 하였다. 이는 단순하게 나열된 과거의 역사적 사실들이 지금 살고 있는 역사가의 관점으로부터 평가되고 인식됨을 의미하고, 역사가의 철학적 관점이 얼마나 중요한지를 나타내는 말이기도 한다.

이와 관련하여 터널기술을 생각해 보면 터널기술자는 자신이 살고 있는 시대의 터널기술을 연구할수록 보다 큰 주의를 기울여야 한다. 어떤 기술에 대한 경험 관련자가 상당히 살아 있고, 그 기술과 관련된 1, 2차 문헌들이 아직도 계속 남아있으며, 무엇보다도 터널기술자 자신이 그 당시의 기술적 상황에 대해 심각하게 영향을 받을 수 있기 때문이다. 따라서 전세계적으로 통용되고 오랜 경험을 통하여 개발되어왔던 기술자체를 특정화하거나 개인적인 성과물로서 규정하는 것은 상대한 오류를 포함하고 역사적 진실을 왜곡할 수 있음을 정확히 인식해야 할 것이다.

NATM이라는 단어는 이러한 역사적 오류를 내포하고 있음에도 우리에게 너무 친숙하고 너무 많이 사용되어 온 것이 사실이다. 이는 잘못된 역사적 진실이 검증 없이 오랫동안 교육되고 사용되어 마치 진실처럼 보이는 현상과도 같다고 할 수 있다. 우리에게서 이러한 역사적 사실이 많은 것이 현실이고, 또 그렇다고 우리생활에 미치는 영향이 그리 크다고 할 수 없기 때문에 관심이 적을 수밖에 없다.

하지만 이러한 잘못되고 왜곡된 진실이 분명 바로 잡히고 올바르게 통용되어야 함은 물론이다. 즉 다시 말하면 역사적 발전은 반드시 모든 사람들의 역동적 산물이듯이 터널기술의 발전 또한 모든 터널기술자들의 노력의 결과임을 모두가 인식할 때 보다 효율적이면서 안전하게 터널링

을 하기 위한 우리의 터널기술자들의 노력 또한 계속될 수 있을 것이다.

또한 우리현실에서도 터널공학의 역사적 발전과정에 대한 정확한 교육이 뒷받침 되므로써 과거의 터널기술에 대한 올바른 이해가 이루어졌으면 한다. 또한 우리나라에서의 터널기술의 역사도 정확하게 조사되고 평가되었으면 하는 바램이다. 우리의 경우 많은 선진터널기술의 도입이 주를 이루고 있지만, 이제는 세계 그 어느 나라보다도 터널링에 대한 기술발전이 이루어지고 있고, 또한 공학적으로도 중요한 프로젝트가 진행되고 있는 현재의 상황을 고려한다면, 터널의 역사적 발전을 거울삼아 보다 효과적이고 새로운 터널기술의 발전을 위해 우리 터널기술자들이 전체적으로 노력하고, 이러한 힘이 한곳에 모여 터널기술강국으로서의 위용을 가지는 그 날을 기대해 본다.

#### 참고문헌

1. K. Kovari(1994), Erroneous Concepts behind the New Austrian Tunnelling Method, Tunnels and Tunneling
2. K. Kovari(2001), The Control of Ground Response - Milestones Up To the 1960s, Proceedings of ITA 2001 World Tunnel Congress Vol. I