

<기술해설>

NATM 개념의 오류에 관한 고찰*

Kalman Kovari**, 김영근***

들어가는 말

본 논문은 스위스 쾰리히 공과대학 암반공학부 터널 담당 교수 Kalman Kovari박사가 1993년 10월 14일 오스트리아 팔스부르크에서 개최된 제 42회 지반공학회에서 발표한 것으로, 원제는 독일어판 [Gibt es eine NÖT], 영어판 [Erroneous Concepts behind NATM]이다. 이 논문은 현재 영어, 일어, 프랑스어, 포르투갈어, 스페인, 체코어로 번역되어 있어, NATM에 대한 비판적 토론이 국제적으로 활발히 진행되고 있는 중에 본인이 Kovari박사에게 연락을 취해 논문에 대한 번역과 본학회지에의 발표계제를 허락받았다.

국내에서 NATM이 정식으로 도입되기 시작한 것은 1980년대 서울시 지하철 도심지 구간 터널공사였고, 이후 십여년 동안 각종 도심지 터널, 도로터널, 산악터널 등에 광범위하게 적용되었으며, 이와 더불어 해석수법, 시공기계, 보조공법 그리고 계측관리수법의 발달을 통하여 안전하고 경제적인 터널시공을 추구하려는 노력이 계속되어 왔다.

NATM은 공법(Method)이라기 보다는 개념(Concept)이자 원리(Philosophy)이다. NATM은 과학적이고 경험적인 방법으로, 이론적 근거인 지보반응곡선을 제시함으로써 현장계측의 중요성을 가져다 주었다. 그러나 실제 터널공사에서 적절한 지보시기, 지보량 등을 결정하기가 매우 어려운 것이 사실이다.

본 논문은 NATM의 개념을 매우 강도높게 비판한 것으로, 논문의 내용과 다른 의견이 많을 것으로 생각한다. 하지만 본 논문을 번역하여 게재한 것은 국내에서 도입되어 광범위하게 적용되고 있는 NATM의 원리, 원칙 그리고 설계·시공법·계측관리에 대해 다시 생각하느라 NATM의 문제점을 공유하고자 하는 것이다. 이와같은 논의를 통하여 터널과 지하공간개발이 활성화되고 있는 국내에서, 국내지반에 적합한 터널공법, 보다 경제적이고 안전한 터널공법의 발전에 조금이

나마 기여할 수 있으면 하는 바램이다.

본 논문은 영어판과 일어판을 중심으로 번역을 하였으나, 짧은 지식으로 인해 부족함이 많더라도 폭넓은 이해를 구하는 바이며, 끝으로 논문의 번역과 발표계제를 허락한 Kovari박사에게 감사드리는 바이다.

NATM 개념의 오류에 관한 고찰

NATM공법의 주요 저자인 Müller는 NATM(New Austrian Tunnelling Method)은 하나의 사고체제(Structure of thought)로 표현한다. 본 논문에서는 이러한 사고체제는 이론적 근거에 의해 확립된 것이 아니라, 오히려 두가지의 기본적인 잘못된 개념(오류)를 포함하고 있음을 보여줄 것이다.

첫번째는 NATM의 정의에서 말하는 지반이 支持構造(Support structure)의 일부라는 것이다. 보다 면밀한 검증을 통해서 이러한 개념은 근거가 없음(고유한 개념이 아님)을 보여줄 것이다.

두번째는 NATM 이론에서 소위 Fenner-Pacher의 지반특성곡선(지반반응곡선, Ground reaction curve)에 의하여 터널라이닝의 최적설계가 가능하다고 주장하는데 있다. 그러나 이러한 주장은 이론과 경험의 부족으로 인하여 근거가 없다는 것이다.

본 논문의 마지막 부분에서 왜 이러한 잘못된 개념이 공학자들에게 신뢰를 얻을 수 있었는지? 왜 NATM 이론이 오랫동안 반론없이 계속되어올 수 있었는지에 대해서 논하고자 한다. 그 이유는 NATM 정의가 막연하고 불확실하여 그 오류를 논리적으로 설명하기가 매우 어렵기 때문이다.

*First publication in TUNNEL/1/1994,
Bertelsmann Fachzeitschriften, Germany

**Prof. Dr., Swiss Federal Institute of Technology
Zurich

***대우건설기술연구소, 선임연구원(공학박사)

1. NATM의 공식정의

1980년에 국제터널협회(ITA)의 [지하공사]에 관한 오스트리아 국내위원회는 NATM의 공식정의(Official Definition)[1]를 10개 국어로 제시하였는데 다음과 같다.

『신오스트리아 터널공법(NATM)은 지하공동 주변의 지반(암반 또는 흙)은 링형상지반의 지지작용에 의해, 하중을 지지하는 구조부재(Load bearing structural component)가 된다는 개념에 기초한다』

이러한 링형상지반을 이하 [지반링 또는 지반지리링(Ground Ring)]이라 간단히 언급한다.이러한 정의는 이하 3가지 주요한 記述를 포함한다.

- 지반은 하중을 지지하는 구조부재가 된다.
- 이를 설명하기 위해서는 특별한 개념(Concept)이 필요하다.
- 그 개념은 지반지리링의 활성화(Activation)으로 구성된다.

1.1 支持부재로서의 지반

전술한 NATM의 정의에서 지반(암반 또는 흙) 자신이 지지부재(Load bearing system)의 일부가 된다는 것이 핵심이라 할 수 있다. 이것이 NATM의 특징으로 다른 터널공법과 다른점이라는 것이 강조되었다. 즉 NATM에서는 지반이 스스로 구조부재(Structural component)가 된다는 것이다. 이러한 기본적인 주장으로부터 각종 NATM에 관련된 문헌에서 잘 알려진 원리가 유도되고, 보고되었다. 예를들면 NATM에서

- 지반의 지지능력(Support capacity)이 발휘되도록 한다.
- 지반이 자신을 지지한다.
- 주요한 지지부재는 주변지반이다.
- 지반은 재하체(Loading)로부터 내하체(Supporting)로 전환된다.
- 지반의 자기지지능력(Self supporting capacity)을 활용한다.
- 지보공은 지반과 함께 작용한다.

NATM만이 지반 지지구조부재로 작용한다는 주장은 기본적으로 잘못이다. 실제로 지반의 지지구조적 작용이 없는 터널링은 생각할 수 없다. 기술자가 지하공동을 지지하는 어떤 기술적 수법을 사용하든지간에 지반이 가지고 있는 본래의 지지능력에는 차이가 발생하지 않는다. 오래전부터 사람들은 암반을 지배하는 역학

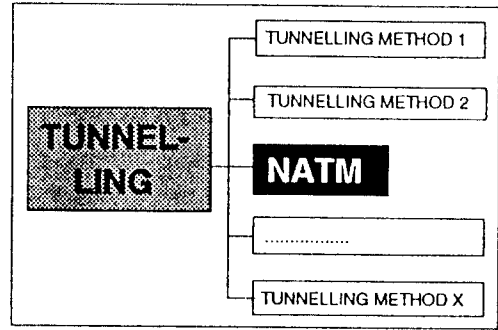


Fig. 1. NATM 정의의 목적.

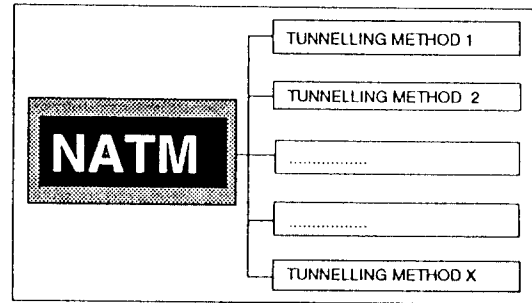


Fig. 2. NATM 정의의 실제적 성과.

법칙을 본능적으로 신뢰함으로써 그들의 목적에 맞는 다양한 형태의 지하공동을 만들어 왔다. 구조부재로서의 지반을 고려하는 것은 터널 개념으로는 당연한 것이다. 이것은 기본적인 역학법칙으로부터 유도되는 것으로서 경험과는 별개의 것이다.

따라서, NATM은 그 자체에 보편적 필요성(지반의 구조적 지지작용)을 주장하지만, 그것은 모든 다른 터널공법에도 마찬가지이며, 본질적으로 터널링의 특징이 된다. NATM 정의의 이론적인 오류를 설명하기 위하여 다음과 같은 잘못된 정의의 간단한 예를 들어보자.

“새로운(신) 수영기법은 부력이 작용하는 물이 지지매체가 된다는 개념에 기초하고 있다.”

이 예에서도 터널링에서와 마찬가지로 자연법칙에 의한 메카니즘이 작용한다는 것(여기서는 부력, NATM경우에는 구조적지지)은 개념이나 방법에 따라 달라지지 않는다. 따라서 Sub-class를 정의하는데 그것이 속한 Class의 주요특징을 사용했기 때문에 위의 두 정의는 잘못된 것이다. NATM 정의에서의 이러한 오류는 Fig. 1과 Fig. 2에서 설명된다. 정확한 NATM의

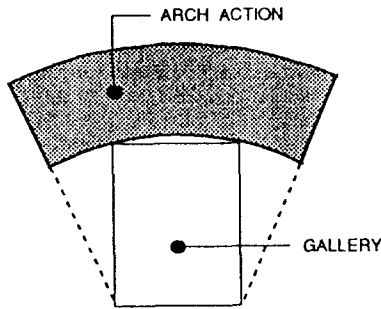


Fig. 3. Engesser에 의한 점착력이 없는 지반에서의 아치작용(1882).⁵⁾

정의는 Fig. 1에서와 같이 각종 터널공법의 하나에 위치하고 있다(다른 터널 공법과 다른 어떤 특성을 갖는다). 그러나 NATM은 Fig. 2에서와 같이 모든 터널 공법에서의 일반적인 기본 성질을 갖는다. NATM은 시공법의 범주를 벗어나 일반적인 터널링 정의하고 있다. 또한 그 자체가 고유한 것으로서 모든 터널링 공법을 고려하는 정의처럼 보인다. NATM의 범위에서 실제 다양한 시공법이 NATM 아래로 분류되는 구분 기준에 관한 문제가 일찌기 논의되어 왔다.²⁾ 현재에는 단순한 공법을 의미하지 않고, 오히려 지식과 기술의 보편적인 집대성으로 믿게 되었다.³⁾ 터널링의 개념이 NATM의 개념으로 대치된 것이다. 따라서 NATM은 터널링에서 대부분의 포괄적이면서 가장 모호한 개념을 동시에 나타낸다. 논리학에 의하면 사고(Idea)의 내용은 그것의 크기에 비례하여 감소한다고 말한다. 따라서 NATM에서 유동적인 것은 시공법이 아니라 임의로 해석할 수 있는 NATM의 정의이다.

그러면 누가 터널링에서 지반의 구조지력의 법칙을 일깨웠는가?

1879년 Ritter⁴⁾는 어느 깊이의 터널에서는 지압(Rock pressure)의 영향이 없거나, 또는 상부암(Overlying rock)의 영향은 거의 없음, 즉 암반자체가 수직하중을 지지함을 고찰했다. 3년후(1882년), Engesser⁵⁾는 점착력이 없는 지반에는 터널천단의 침하에 의해서 아치작용이 발생한다는 것을 제안했다(Fig. 3). 그는 암반변형과 터널라이닝에 작용하는 지압의 관계를 인식하고 분명하게 정식화했다.

1912년 Wiesmann⁶⁾은 암반의 지지기능을 다음과 같이 설명했다.

[암반에서의 평형상태가 지하공동 굴착에 의해 무너

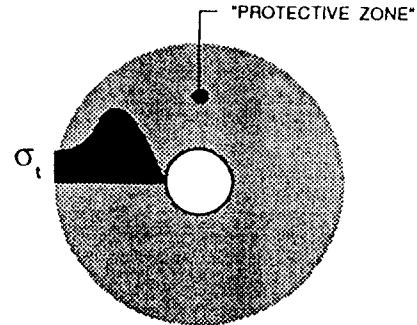


Fig. 4. Wiesmann에 의한 보호 zone(1909/1912).⁶⁾

진다면, 공동주위 구성재료 입자는 굴착된 재료에 의해서 지지되는 것 만큼의 과잉압력에 대하여 저항하지 않으면 안된다.]

또한 [터널기술자는 이와같은 과잉지압에 대한 지보공을 설치할 필요가 없다. 이러한 지압은 보호 zone(Protective zone)에 의해 지지된다. 터널기술자는 이러한 보호 zone의 보존(Preservation)에 대하여 관심을 가져야만 한다.]

Wiesmann이 이해하는 보호 zone에 의해서, 응력의 재분배가 일어나는 공동주위의 지반은 2차원 상태에서는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 구멍이 뚫린 판과 같다. 보호 zone의 경계는 Sharp하지 않다.

50년후, NATM이 생긴 1962년, Rabcewicz⁷⁾은

[지하공동을 건설하는데 실제로 지반을 지지하는 것은 지반자신이다.]

『근대적 터널링의 가장 중요한 역할은 암반의 지지기능을 개발하고 가능한한 보존하는 것(To preserve)이다』

이라고 했다. Rabcewicz는 이러한 견해가 당시의 교과서에 잘 알려져 있고, 가르치고 있음을 알지 못했다. 따라서 그는 근대 터널링에 이와같은 사실적인 내용을 적용하지 않고, 같은해 그에 의해 소개된 NATM에서만 제한적으로 사용했다. 결과적으로 NATM은 이미 1962년 발생시부터 사고적 무리(잘못된 전제조건)에 근거하여 확립되었다.

오스트리아 터널협회의 Müller와 Pacher는 NATM의 공식정의를 작성하는데 금세기초 이래로 이미 엔지니어들 사이에 지반의 지지기능에 대하여 공감대를 형성하고 있음을 알지 못했다.

1923년 Maillart가 기술한 또다른 표현을 보면⁸⁾ 다음

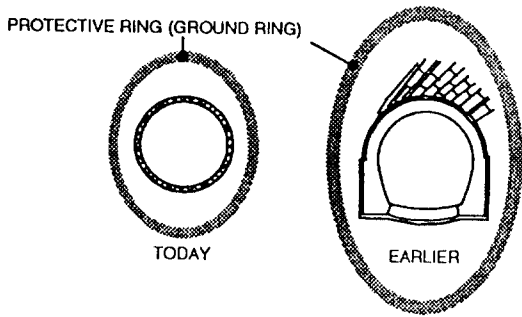


Fig. 5. Müller와 Fecker에 의한 보호링(지반링).¹⁰⁾

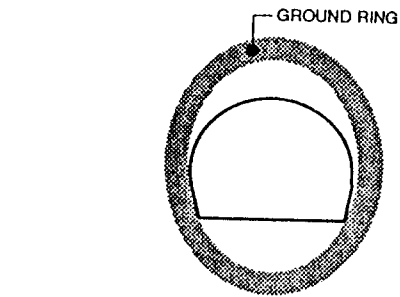


Fig. 6. Rabcewicz에 의한 지반링(1944).¹¹⁾

과 같다.

[외부지압에 대항하는 터널라이닝을 설치한다면, 지반의 강도(내하력)는 증가하게 되고, 자신을 지지하는 것(to support itself)이 가능하게 된다.]

NATM이 제안되기 6년전인 1956년, Mohr⁹⁾는 한 강연에서 다음과 같이 기술하고 있다.

『지반이 약간의 변형을 허용한다면 라이닝에 작용하는 힘이 작아질 것이다.』

또한 [이러한 지식을 실제로 적용하는 경우에는 지반이 지반자신을 지지할 수 있다(to support itself)는 점을 필요로 한다.]

NATM이 지반의 지지작용을 전적으로 고려한다고 주장하는 것은 이론적 오류일 뿐만 아니라 터널링의 기본적인 법칙을 인식하고, 명확히 정식화했던 이전 사람들의 업적을 무시하게 되는 것이다. NATM은 적절한 참고문헌의 인용없이 이전시대의 터널기술자와 과학자가 먼저 사용한 숙어나 표현을 전제조건에 사용하고 있다.^{6,8)}

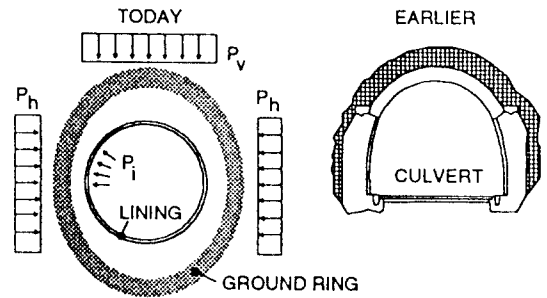


Fig. 7. Müller와 Fecker에 의한 지반링.¹⁰⁾

1.2 지반주위의 [지반링]의 활성화

NATM의 공식정의에 의하면 지반링의 활성화(Activation of a ring like body of rock)에 대하여 언급하고 있다. 지반링에 관한 용어는 NATM 특유의 것으로 터널공법에 관한 다른 문헌에서는 볼 수 없다.

지반링은 무엇인가? NATM 문헌과 오스트리아 국내 위원회의 Brochure[2]에서 이 문제에 대한 여러가지의 답이 있지만 이들은 모두 기본적으로 서로 다르다. 여기서 NATM 저자들의 논의중에 사용된 다양하고 모순된 생각들을 간략하게 요약한다.

- 지반링은 소위 보호zone이라 불린다(Fig. 5).
- 초기터널공법에는 지금의 NATM보다 공동으로 부터 더 멀리 지반링을 형성한다(Fig. 5).

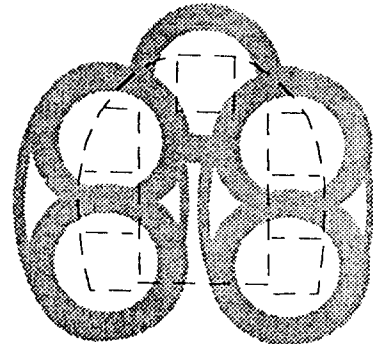


Fig. 8. Müller에 의한 다단굴착시의 지반링.¹²⁾

- 지반링은 종종 타원형으로 나타난다(Fig. 5).
- Rabcewicz¹¹⁾에 의하면 지반링은 공동에 밀착되었으나, 반면 Müller와 Fecker¹⁰⁾는 그렇지 않다(Fig. 5, 6).
- 지반링은 허용가능한 암반변형에 의해서 발생하는데, 만약 암반변형이 충분하지 않다면 지반링은 폐합되지 않는다.¹¹⁾
- 터널역학에서 보면 복공¹⁾과 지반링만 계산에 고려

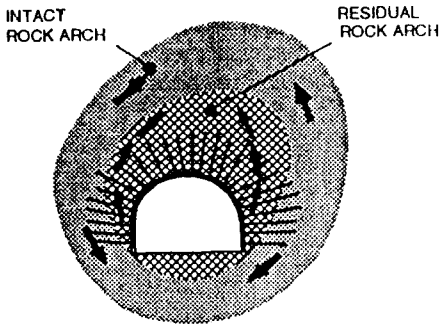


Fig. 9. Hagenhofer에 의한 건전부와 잔류강도부의 암반 아치.³⁾

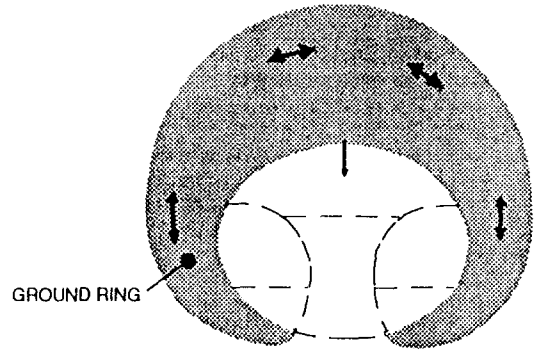


Fig. 11. EURO 터널에서 지반링의 특수한 모양(Myers emd¹⁵⁾).

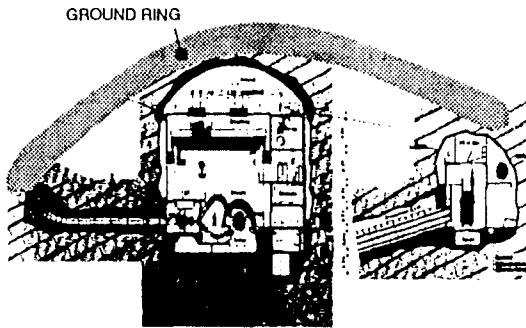


Fig. 10. Wisser에 의한 지하공동의 지반링.¹⁴⁾

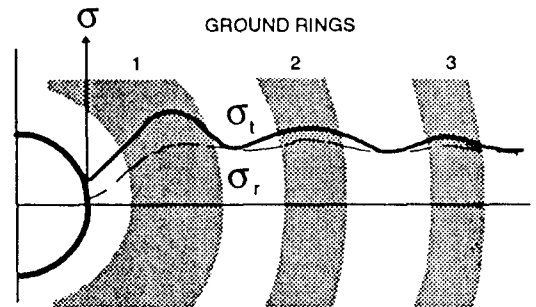


Fig. 12. Müller, Sauer, Vardar에 의한 양파껍질모양 쉘 구조의 지반링.¹⁶⁾

되는데(Fig. 7), 지반링은 한방향 또는 다른 방향으로 하중이 작용하는 것 같다. NATM 이전 공법 개념에서는 지반링은 분명히 부분적으로 작용하지 않았다.

- 다단굴착(Multiple adit)공법에서(Fig. 8), 일련의 지반링이 형성되는데,¹²⁾ 이는 NATM의 개념에서 이는 암반에 손상을 주는 것이다. 따라서 NATM에는 전단면 굴착이 주요한 원리임을 알려주고 있다. 소성 zone은 지반링의 형성을 방해한다.¹³⁾
- 건전한 상태와 잔류강도 상태에 의한 지반링이 있다고 보고되었지만,³⁾ 후자는 폐합되지 않는다. 두 가지의 차이가 무엇인지 설명하지 못한다.(Fig. 9)
- 공동의 근접부에서 지반링(보호 zone)¹⁴⁾은 Hall의 천장모양, 즉 아치모양을 갖는다(Fig. 10). 그러나 이러한 아치가 무엇을 지지하는지 명확하지 않다. 또한, 왜 Invert부에서 지반링이 형성되지 않는지 설명되지 않았다(Fig. 10).
- 유로터널의 입체 교차단면에서의 지반링¹⁵⁾은 특히

이상하다(Fig. 11). 천정부가 매우 두껍고, 측벽부로 점점 가늘어지면서 바닥에서는 폐합되지 않는다.

- NATM 문헌에서 몇가지 동심원상의 지반링의 형성을 기술하고 있는데, 그것은 암반을 양파껍질모양의 쉘구조¹⁶⁾로 가정하는 것이다(Fig. 12). 동시에 또는 계속적으로 형성되는 지반링은 설명되지 않는다.

NATM에 관한 문헌에 의하면 지반링은 이하의 기본적인 4가지 다른 가정을 선택적으로 사용한다(Fig.13).

1. 터널에서 떨어진 곳에 형성되는 Wiesmann의 보호 zone (자연적 구조작용)
2. 암반에서 접선방향 응력이 최대가 되는 영역(보호 zone)
3. 소성 zone
4. 시스템 볼팅(Grid of anchors)에 의해 정의된 암반 zone

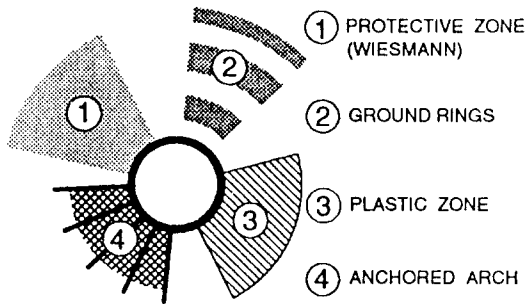


Fig. 13. 지반링의 다양한 개념.

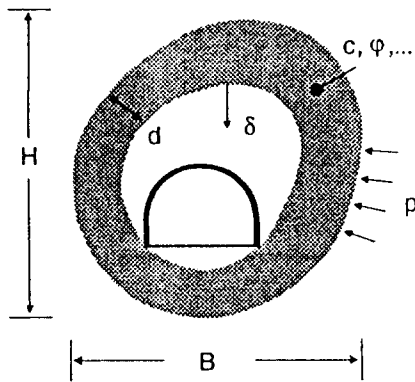


Fig. 14. 지반링의 형상, 두께 및 재료특성.

NATM 문헌에서 저자들은 4개의 다른 가설을 사용하고 있고, 같은 논문에서조차 지반링의 의미가 변하고 있다.

그러므로 NATM의 저자들도, NATM을 지지하는 어떤 사람들도 지반링의 모양과 두께가 어떻게 결정되는지에 대한 정보를 제공할 수 없다. 심지어 구성재료의 역학특성조차도 규정하지 못했다(Fig. 14). 지반링의 두께가 임의적으로 선택되고 있음을 보여주는 경우도 있다.¹⁷⁾ Fig. 14는 공학적인 관점으로부터 링시스템을 조절하기 위해 알아야 될 요소를 보여준다. 그러나 Fig. 14에서 지반링의 Quality를 조절할 수 있을까? Müller¹⁸⁾는 [링모양의 폐합된 보호 zone은 대부분의 터널기술자가 실제로 경험하고 있다]라고 말하고 있다. NATM은 지반링의 확립을 전제로 한다. 지반링이 형성되지 않거나, 단지 점차적으로 형성되거나, 링 폐합이 불완전하면 사람들은 그것을 활성화해야만 한다.¹¹⁾ 이런 조건하에서 어떤 사람은 시스템 볼팅의 도입이 필요하다고 하고, 다른 사람은 암반변형을 조절할 필요가 있다고 하고, 또다른 사람들은 지반의 변형을 허용하여

지반이 자신을 지지할 수 있도록 기다릴 필요가 있다고 말한다. 그러나, 지반링의 효과는 쇼크리프트에 의해 발생될 수도 있다. NATM의 중요한 공식중의 하나는 변형을 허용하고, 지반 스스로 지지할 수 있도록 시간을 허용한다는 것이다. 그러나 터널링에서 이상적인 지보에 의해 암반변형을 완전히 막을 수 없다. 즉 지보공의 시공은 필연적으로 시간이 소요되므로 이 전제조건은 받아들일 수 없고, 오히려 잘못된 것이다.

NATM의 공식정의의 검토결과를 요약하면 다음과 같다.

① 터널 굴착공법에 관련없이 주변 지반은 항상 구조 부재의 일부로 표현된다. 이러한 현상에 관한 인식은 NATM 저자에 의한 것이 아니다.

② 지반링을 활성화하는 NATM의 필요조건은 성립될 수 없다. 지반링의 적극적 이용에 관한 언급은 너무 모호하고 과학적인 용어가 아니다. NATM의 정의는 모호한 정의임이 판명되었고, 따라서 한개의 미지의 것(NATM)을 설명하기 위해서 또하나의 미지의 것(지반링의 구조적 활성화)의 도움을 받아야 한다.

Müller와 Fecker¹⁰⁾는 NATM에 관해서 다음과 같이 기술하였다.

[실제로 NATM을 적용하려는 모든 사람들은 이 공법에 대한 다른 개념을 갖는다]

1978년 이래, NATM의 정확한 記述에 대하여 변화하고 있다. 따라서 질문은 “NATM이 실제로 존재하는가?”이고, 이에 대한 대답은 분명히 No이다.

2. 지압의 최소화(Minimizing Rock Pressure)

다음으로 NATM의 중심적 개념인 터널라이닝에 적용하는 지압의 최소화에 관한 문제를 검토한다. Pacher¹⁸⁾가 1964년에 보여준 지반특성곡선(지반반응곡선)과 이것에 기초한 지보공설계의 최소화가 1972년 이래 NATM의 중심개념이 되었다.¹⁹⁾ Müller¹²⁾에 의하면 『NATM의 주요 개념은 Pacher의 지반반응곡선에 기초하고 있다.』

여기서 다루고자 하는것은 무엇인가? 지반특성곡선과 지보공특성선(Lining characteristics)의 교점중에서 최저위치(최적점)를 간단하게 선택하는 문제이다(Fig. 15). Rabczewicz¹⁹⁾는 [계측의 도움으로 지압을 적

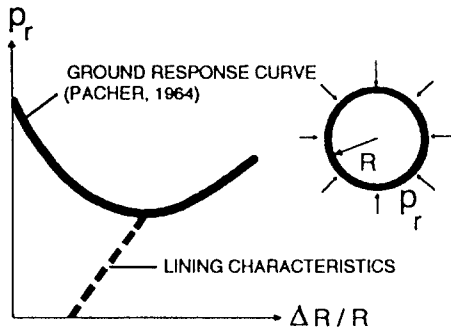


Fig. 15. Müller와 Fecker에 의한 지압의 최적화.¹⁰⁾

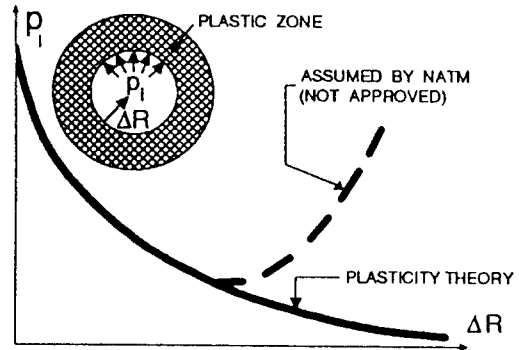


Fig. 17. 소성이론에 의한 지반반응곡선.

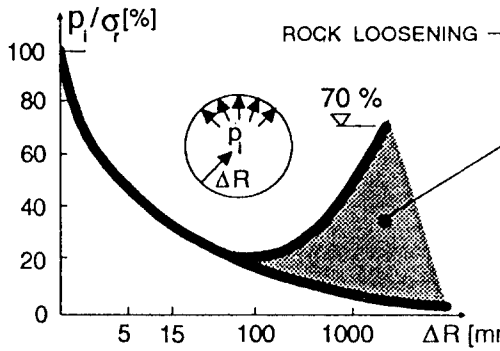


Fig. 16. Müller에 의한 변형을 연화에 기초한 지반반응 곡선.¹²⁾

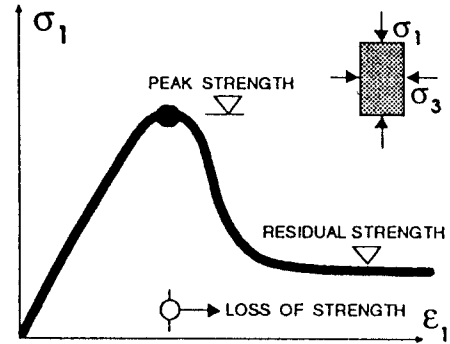


Fig. 18. 전단 및 삼축시험에서의 강도의 손실.

절히 유지 조절하여 지보공 반력(lining resistance) P_i 를 최적치에서 선택할 수 있다.]

Müller와 Fecker의 Fig. 15에서 횡축은 반경방향의 변위를 $\Delta R/R$ 이고 종축은 지보공반력 P_r 이다.

Fig. 16에서는 지반특성곡선은 두갈래로 갈라진 곡선이다.¹²⁾ 횡축에 접근하는 낮은쪽의 곡선은 소성이론에 의해 구해졌다. NATM에는 윗쪽으로 뺀 곡선을 가정하였다. 이것은 지반의 이완(loosening)과 변형연화(Strain softening)에 의해서 일어난다고 생각하고 있다. 이 그림은 Müller¹²⁾에 의해 제시되었는데, 반경방향의 단위는 mm이고, 종축의 지보공반력은 상부지압에 대한 %로 표시하고 있다.

Müller는 변형에 의한 이완의 영향을 다음과 같이 정의하였다.¹²⁾

[지압이 높아질수록 암반의 이완은 증가한다. 이러한 증가는 지압현상을 변화시킨다.]

그러한 과정은 연쇄반응(chain reaction, 한번 유도된 반응은 같은 형태의 반응을 야기한다.)과 유사하다.

Fig. 16의 Müller의 그림을 유심히 보면, 윗쪽으로 꺾이는 곡선은 연쇄반응의 결과에 의해 급격히 상승하는 것 같다. 그래서 최대 이완하중(지압)은 전체 지압의 70%에 달하게 된다. 예를들어 지하 1000 mm 깊이에 위치한 터널에서 Fig. 16에 의한 지압은 700 m에 해당하는 지압이 작용한다고 할 수 있다. 이것은 분명히 불가능한 것이다. 이러한 극단적인 모순에 대한 이유는 무엇인가? 이것은 암반에서의 연쇄반응에 대한 가정이 잘못되었기 때문이다. 실제로 Pacher가 가정한 형상의 지반반응곡선은 이론적으로나 경험적으로도 증거가 없다. Fig. 17에서 지반반응곡선(실선)은 소성이론에 의해 이론적으로 구할 수 있다. 전단 또는 삼축시험에서 볼 수 있는 강도의 저하(변형연화)(Fig. 18)를 고려하든 안하든 곡선은 위로 올라가지 않는다.

NATM의 설계를 위한 지반반응곡선에 관한 상세한 연구 검토서²⁰⁾에서 아래로 오목한 모양의 Pacher 곡선의 가능성은 언급조차 되지 않았고, 또한 ITA의 지침²¹⁾에서도 이런 모양의 특성곡선에 대한 언급이 없다. 그

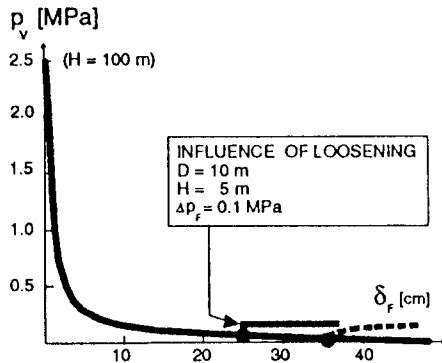


Fig. 19. 지반반응곡선에서의 천단부의 이완 영향.

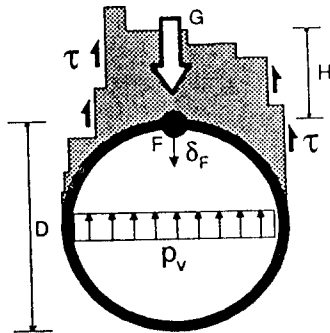


Fig. 20. 암반이완에 의한 천단라이닝에서의 하중 증가.

리고 “NATM의 유한요소해석²²⁾”와 “NATM과 유한요소²³⁾”에도 활성화된 지반링 구조 또는 Pacher 곡선에 대해서 기술하고 있지 않다.

NATM 문헌에서 지반반응곡선이 아래로 향하는 경향으로부터 위로 변하는 하나의 가능성이 있는데, 그것은 터널천단부에서 불리한 절리나 미끄럼면의 발달에 의해 파괴(붕괴) 상태에서의 암괴가 부분적으로 또는 전적으로 모양으로 떨어져 나와 암괴의 자중에 의한 지압이 증가하는 경우이다. 이러한 가능성은 ITA지침²¹⁾에서 언급되어 있다(Fig. 19, 20). 그러나 그러한 돌발적인 현상이 터널의 어느 지점에서 어떤 범위로 언제 일어나는지 계산으로부터 예측할 수는 없다. 여기서 중요한 것은 연쇄반응이 유도되지 않는다는 것이다. Fig. 19에서 보는바와 같이 5 m 높이의 암체(Fig. 20)의 분리에 의한 지반반응곡선에 대한 영향이 얼마나 작은지 알 수 있다.

이것은 Rabcewicz¹¹⁾가 다음과 같이 말하는 것으로부터 알 수 있다.

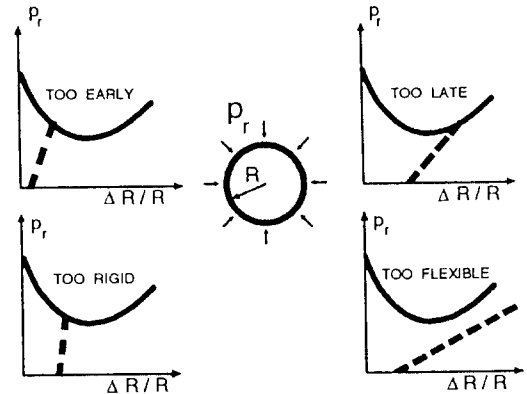


Fig. 21. NATM의 6가지 기본원리(Müller와 Fecker¹⁰⁾).

[경험있는 터널기술자에게는 이완된 지압(Rock loosening)은 대부분 안전하다] Müller¹²⁾ 또한 [터널 굴착시 통상적으로 암반 이완영역은 0.5~5 m 정도이다] 라고 하였다. 그러나, NATM 문헌에는 지반의 이완에 의한 위험성을 경고하고 있다. Rabcewicz²⁴⁾는 [허용할 수 없는 이완을 막는 것은 NATM에서 절대적으로 필요한 것이 된다고 하였다. Rabcewicz는 “허용가능한 이완(admissible loosening)”이라는 용어를 만들어 냈다. 이것은 진술한 [이완된 하중이 해가 없다는 주장과 모순되며, 허용가능한 이완에 대한 개념이 정의 되어 있지 않다. Müller¹²⁾는 [불행하게도 어느 정도의 이완량이 얼마나 많은 변형을 일으키는지에 대한 실험적인 증거가 없다]라고 언급하였다. 지반링에 대한 이해와 상관없이 지반링과 지반반응곡선 사이에는 어떤 관계가 있어야 한다. 그러나, NATM 문헌에서는 지반링의 활성화와 Pacher가 제안한 지반반응곡선과의 어떤 관계가 있는지 보여주지 못하고 있다.

이상을 요약하면 다음과 같다.

NATM의 의미에서 지보공반력의 최적화는 불가능하다. 왜냐하면 Fig. 21에 의한 지반반응곡선의 전제조건이 이론적으로 설명될 수 없고, 경험적으로도 증명할 수 없기 때문이다. 따라서 NATM의 원리인 [지보공을 너무 빠르지 않게 또는 너무 늦지 않게, 너무 강하지 않게 또는 유연하지 않게 시공하는 것¹⁰⁾은 의미가 없다. 지보공의 강도, 변형, 물성 그리고 설치시기의 최적선택은 다른 기준에 기초해야만 한다. 이것은 터널링에 가장 어려운 문제중의 하나이다. 따라서 NATM에 의해 이것은 취급하는 것은 오히려 그 자체가 터널설계가 된다.

어떤 이론이 많은 오류를 포함한다면 그것은 더 큰 오류를 만들게 된다. Sauer는 “NATM의 이론과 실제”²⁵⁾에서 몇가지의 특성곡선을 보여준다.

[관찰, 경험 그리고 계측을 통하여, 굴착지역에서 추가적으로 최대 및 최소점의 존재를 설명하는데 Fener-Pacher 곡선의 확장이 더욱 요구된다.]

이의 주장을 정당화하는 것이 변형된 Pacher 곡선이다. 그것은 6개 변수간의 관계를 보여 주고 있다. 각 좌표측은 단지 하나의 변수를 나타내는 것이 아니라 3개의 변수를 나타내고 있다. 전체적인 혼란을 완성하기 위해서 6개의 변수중 2개는 정의하지 않았다. 이러한 노력은 부정확한 정식화가 과학적이라는 인상을 줄 수 있다. ITA의 지하공간을 위한 오스트리아 국내위원회가 왜 그러한 주장을 중지하지 않는지 이해할 수 없다.²⁶⁾

3. NATM의 사고방식과 연역수법

NATM의 사고체계에 대해서 일반적인 평가를 수행하고, NATM에 대한 평가를 끝내고자 한다.¹⁰⁾ 사고(Idea) 개념이 우리의 생각과 판단의 중추(Backbone)를 형성함을 알 수 있다. 과학지식의 근본은 명확히 정의된 개념과 사실적인 결론에 도달할 수 있는 올바른 방법을 전제로 한다. 유효한 주장 없이 또는 잘못된 전체에 기초한 지식은 사실일 수 없다. NATM의 개념을

형성하는 방법을 살펴보면, 전체적으로 명목적 정의(Nominal definition)를 사용하고 있다. 사실에 기초한 정의와의 달리 명목적 정의는 단지 개념과 불확실하게 관련된다. 사실에 근거한 정의가 명확한 개념을 가진다. 따라서 진실된 정의만이 과학적 영역에서 적절한 것이다.

표 1에는 NATM 문헌에서 인용된 것인데, 명확하게 정의된 개념을 기대할 수 없고 단순한 단어로 이루어져 있음을 알 수 있다. 어떻게 용어가 사고계(System of idea)에 작용할 수 있는가. 이것은 계속 증식되고 있다. NATM 문헌으로부터 지반링에 관련된 표현들이 표 2에 나타나 있다.

이러한 다양한 용어는 괴테의 파우스트를 떠올리게 한다.

[It's exactly where a thought is lacking

정확히 사고가 부족한 곳에서

That, just in time, a word shows up instead.

그때 마침 말이 대신 나타난다.

With words you can argue beautifully

말로써 아름답게 논쟁하고

With words you can make up a system]

말로써 시스템을 만들 수 있다.

만약 정의가 부정확하면, 그것에 근거한 판단은 사실이 아닐 수 밖에 없다. NATM 문헌에는 잘못되고 불완

표 1. 명목적 정의(Nominal definitions)

Nominaldefinitionen	Nominal definitions*	명목적 정의
Eigentraumvermögen des Gebirges	Capacity of ground to support itself	지반자체의 지지력
Entfestigungsempfindlichkeit	Sensitivity to strain softening	변형을 연화의 민감도
Entspannungsbereitschaft	Capacity for stress relief	응력완화 능력
Entspannungsgeschwindigkeit	Rate of stress relief	응력완화 속도
Halbsteife Schale	Semi stiff lining	반강성 복공
Kräftevakuum	Force vacuum	응력 공백
Momentenfilter	Bending moment filter	휨모멘트 필터
Nachdrängende Gewichtskomponente	Pushing weight components	미는하중 성분
Nachdrängender Belastungscharakter	Pushing character of loading	하중의 미는 특성
Selbstschutzwirkung	Self-protection effect	자기보호 특성
Setzungsbeeinflusste Tragreserve	Structural reserves influenced by settlements	침하에 의해 영향받는 구조적 여유
Spannungsschatten der Umlagerungen	Stress shadows of the redistributions	재배치 응력 간섭
Spannungsumlagerungsgeschehen	Stress redistribution event	응력재배치 현상
Spannungsgeschehen	Stress event	응력 현상
Spezifischer Zeitfaktor	Specific time factor	시간 인자
Umlagerungsnotwendigkeit	Necessity for stress redistribution	응력재배치의 필요성
Zulässige Auflockerung (Aus dem Schrifttum der NÖT)	Admissible rock loosening (taken from NATM literature)	허용암반 이완

*독일어에서 표현의 의미가 명확하지 않기 때문에 영어역 표기.

표 2. 지반링 관련 용어

Dem Begriff "Gebirgstragring" shinnverwandte W rter	Terms related to "Ground ring"*	지반링 관련 용어
Aussenschale	Outside lining	외측복공
Aussengewölbe	Outside arch	외측아치
Aussenring	Outside ring	외측링
Druckring	Pressure ring	압력링
Entspannungszone	Stress relief zone	응력 완화존
Felstragring	Rock support ring	암반 지지링
Fliesszone	Zone of plastic flow	소성 유동존
Gebirgstragkörper	Rock support structure	지반 지지구조
Gewölbering	Arch ring	아치링
Gewölbeschale	Arch lining	아치라이닝
Gleitbruchzone	Rupture zone	파괴존
Ringgewölbe	Ring arch	링아치
Schutzgewölbe	Protective arch	보호아치
Schutzhülle	Protective cover	보호커버
Schutzzone	Protective zone	보호zone
Stützring	Support ring	지지링
Traggewölbe	Structural arch	구조아치
Tragring	Structural ring	구조링
Tragschalengebilde	Structural shell	구조셸
Zwiebeslschalen	Onion-shell-shaped shell	양과겹질모양 셸
Dickwandiges Rohr	Thick-walled tube	두꺼운벽 튜브
Intaktes Felsgewölbe	Intact rock arch	신선암 아치
In sich verspannende Zone	Self-spanning zone	자기 경간 존
Kastnersche Ohrenzonen	Kastner "ear-shaped" zones	Kastner귀모양 존
Massgebender Gebirgstragring	Critical rock ring structure	한계 암반링구조
Mittragende Zone	Auxiliary rock support zone	보조적 암반지지존
Natürliches Gewölbe	Natural arch	자연 아치
Ohrenförmige Scherzonen	Ear-shaped shear zone	귀모양 전단존
Plastische Zone	Plastic zone	소성존
Pseudoplastische Fliesszone	Pseudo-plastic flow zone	의사 소성유동존
Residueller Gebirgstragring	Residual rock ring structure	잔류암반 링구조
Ringflächenförmige Fliesszone	Ring-surface-shaped flow zone	링면형 구조존
Schalenförmige Tragzonen	Shell-shaped structural zone	셸모양 구조존
Selbsttragendes Gewölbe	Self-supporting arch	자기지지아치
Spannungsverminderte Schutzschalen	Stress reducing protective shells	응력완화 보호셸
Stabilisierter Tragring	Stabilized structural ring	안정화 지지링
Taschenförmige Fliesszonen	Pocket-shaped flow zone	포켓모양 유동zone
Virtuelles Traggewölbe	Virtual structural arch	가상 구조아치
Wiesmannsche Zone	Wiesmann zone	Wiesmann 존
Zungenförmige Zone	Tongue-shaped zone	혀모양 존
(Aus dem Schrifttum der NÖT)	(taken from NATM literature)	

*독일어에서 표현의 의미가 명확하지 않아서 영어역 표기.

전한 결론이 보인다. 동일한 용어가 다른 의미로 사용 되었을 때 잘못된 추측을 불러일으킨다.²⁷⁾ 따라서 판단 을 하는 사람이 주변에 적합한 말을 항상 찾을 수밖에 없고 계속해서 그것을 지지하는 모순된 말을 하게 되는 것이다. 잘못된 결론의 한 좋은 예가 링모양의 지반지 지구조가 어떻게 발휘되는가에 대한 설명이다.

어떤 평가에 하나 또는 여러개의 전제를 충분히 고려 하지 않으면 불완전한 결론이 된다. 지반이 새로운 평

형상태에 도달하는데에 시간이 필요하다는 NATM의 주장은 불완전한 결론이다. 이러한 주장은 어떤 종류의 암반에서만 실제적인 의미를 가질 뿐이다. 만약 어떤 이름이 그들의 일반적인 사용과는 다른 사고(idea)에 적용된다면, 판단의 오차는 발생한다. 그러한 '단어의 남용'은 Sauer²⁵⁾의 최소와 최대를 나타내는 지반반응 곡선의 설명에서 찾아 볼 수 있다.

어떤 지식이 그 정당함을 증명없이 쓰여질 때 판단의

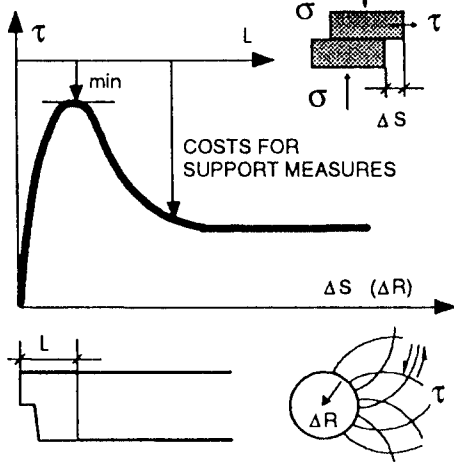


Fig. 22. 전단시험, 막장거리 및 지보공 비용과의 관계 (Sauer¹⁰).

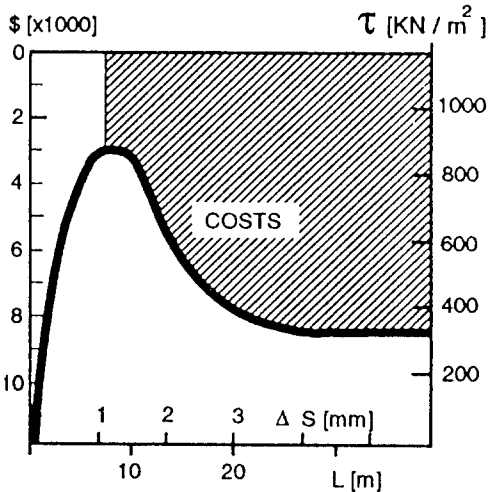


Fig. 23. NATM 이론에 의한 전단강도 함수에서의 지보공 비용.

오차가 발생한다. 이러한 예는 Sauer²⁵⁾의 "NATM의 이론과 실제"에서 볼 수 있다. Fig. 22에서는 다음의 관계를 보여주고 있다.

- 직접전단시험에서 전단변위(ΔS)와 전단응력(τ)의 관계
- 내공변위 (ΔR)과 막장으로부터의 링폐압과의 거리(L)의 관계 Sauer²⁵⁾는 [지보공에 대한 비용은 이 곡선으로부터 유추해서 읽을 수 있다. 지보비용은 최대전단강도에서의 최소지보공이 이루어진다는 가정에서 그 차로부터 구한다.]

따라서, 몇가지 시험실 전단시험에 기초하여 터널에 대한 지보공의 비용을 결정할 수 있는데, 이 곡선은 Fig. 23과 같다. 좌측의 종축은 단위 m당 지보비용을 나타낸다. 그림에서 보면 지보공 비용이 임의의 막장거리에서 갑자기 증가한다.

그러나, Sauer의 NATM 이론은 유효하지 않고 더우기 증명할 수도 없다. 그런 관계가 존재하지 않음을 보여주는 것이 더 쉽다. 그런 잘못된 곡선은 독자에게 다른 터널링 공법으로부터 얻을 수 없는 정보가 NATM 공법에서 얻을 수 있다는 인상을 준다.

NATM 문헌에서 잘못된 판단의 마지막 예로서, 다음과 같은 NATM의 기본적인 사고¹⁾를 살펴 보자

[굴착면적과 굴진장(area and depth of attack)의 올바른 선택에 의해 지반특성의 변화, 자립시간, 막장의 안정성에 대한 적합한 시공법(method of construction and operation)선정]

윗 글을 주의깊게 읽어보면 두개의 표현이 유사함을 알 수 있다. 터널링에서 시공법은 단면을 굴착하는 과정, 즉 굴착면적의 선택(전단면 또는 분할단면으로 할 것인지) 그리고 굴진장(길게 또는 짧게 할 것인지)으로 이해할 수 있다. 따라서 위의 NATM에 관한 표현은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

[시공방법의 올바른 선택에 의한 적합한 시공법 선정]
동의를 같은 표현에 반복하여 사용하고 있음을 알 수 있다. 어떻게 올바르게 선택을 할 것인가에 대한 대답이 나타나 있지 않다.

4. NATM 사고 체계에 관한 결론

NATM에 관한 비판적 논의를 동일한 사고체계에서 수행하는 것은 불가능하다. NATM에 대한 용어가 매우 모호하여 지금까지 면밀한 검증이 없었다.

전체적으로 NATM을 고찰하면서 비판하고자 한 것은 NATM이 비판으로부터 자유롭지 않을 뿐만 아니라 근거가 없다는 것이다.

국내에서의 NATM과 터널공법

Kovari 박사가 논문에서 비판한 것은 지반을 지지구조의 일부라고 하는 생각은 NATM의 독자적인 것이 아니라 터널공법의 일반적인 것이라는 것이다. 또한 지보공의 최적설계를 설명하는데 이용한 지반반응곡선의

존재가 확인되지 않는다는 것이다. 이와같은 NATM의 기본개념에는 NATM이 단순한 공법을 의미하는 것이 아니라 터널공법의 포괄적 개념을 포함하고 있음을 비판하고 있다.

현재 국내에서는 NATM이 도입되어 폭넓게 적용되므로써 국내의 지질 암반에 적합한 터널공법으로 개량되고 안전하고 경제적인 터널공법으로 개발되어 왔다. NATM 적용의 초기에는 지보재로 록볼트와 슛크리트를 기본으로 하고, 필요에 따라 추가적으로 철제지보를 이용하여 터널을 굴착하므로써 많은 터널이 안전하게 굴착되었다. 이와같은 경우에 NATM에 의해 지반자신의 지보능력을 높이고, 터널주변에서의 지반보호링의 형성하는 것이 안전한 굴착에 문체에 도움이 된다고 생각된다.

그러나 각종 지질 암반에 대하여 적용한 결과, NATM의 효과가 충분히 얻을 수 없는 경우가 나타났고, 설계계산에 NATM의 효과를 도입하고 있지만 이에 대한 충분한 검토가 이루어지지 않았다. 또한 NATM 효과에 대한 메카니즘을 충분히 설명할 수 없고, 그 효과를 확인할 수 없어 터널기술자사이에 NATM의 시공성에 대한 불신감과 경제성의 문제를 지적하는 경우가 많아지고 있으며, 재래공법으로도 충분히 터널을 굴착할 수 있다고 생각하는 경우가 있다. 이러한 원인은 NATM을 적용하는데 있어 Kovari 박사가 지적한 NATM 정의가 매우 모호하기 때문이라 생각한다.

국내에 NATM이 도입된 시기에는 록볼트의 타설량과 배치에 대해 설계방법이 명확하지 않고, 또한 슛크리트의 품질과 기술의 신뢰성에 문제가 있었다. 그러나, 여러해 동안 많은 경험이 축적되어 현재에는 터널에 대한 표준공법으로 발전하였고, 산악터널 및 도시터널에서 광범위하게 적용되고 있다.

재래공법이 굴착공간내에서 지보조건이 불명확한 경우가 많은데 비해 NATM에 의한 터널굴착은 지보효과를 터널주변지반과 일체화한다는 것이 큰 잇점이라고 할 수 있다. 그러나 실제시공에 있어서는 재래공법이 지질조건 변화에 대응한 변경이 용이하여, 연약층과 파쇄대를 포함한 지반에서는 재래공법이 유리할 수 있다. 또한, 시공장비와 보조공법에서도 지질 암반상태에 대응한 신기술이 개발되고, 또한 해석수법이 크게 발달하여 그 결과의 검증과 실제제동의 계측을 통하여 시공을 관리할 수 있는 계측관리수법이 다양하게 개발되었다.

요즈음에는 단순히 록볼트나 슛크리트를 이용하는 공법을 NATM으로 이해하지 않고, 지반상태나 굴착단면에 대응하기 위해서는 각종 보조공법을 적절하게 이용하고, 연약한 지반의 경우 막장의 안정시공의 필요성으로부터 각종 주입공법을 적용하므로써 NATM공법의 개념을 확대해서 적용하는 터널공법이 전개되고 있다.

NATM공법을 대단면 지하공동, 부분굴착이 필요한 대단면 터널에 적용하는 경우에는 지반지리링 개념을 적용하는 것이 무리이기 때문에 지보의 메카니즘과 효과를 검토하고 합리적인 시공법의 개발이 필요하다. 또한, 각종 막장안정공법의 개발과 그 평가법, 토사터널에서의 적용성을 검토하고, 그러한 터널공법을 적용하는중에 지반의 지보능력을 고찰하는 합리적인 지보시스템을 채용하는 것에 기본적인 문제가 있다.

국내에서 이 논문의 발표를 계기로 현재 적용하고 있는 각종 터널공법의 원리 원칙을 다시한번 고찰하고, 보다 안전하고 경제적인 터널공법(해석 설계 시공)의 개발과 적용에 대해 생각할 필요가 있다고 생각한다.

REFERENCES

1. Neue Österreichische Tunnelbaumethode, Definition und Grundsätze, Selbstverlag der Forschungs-gesellschaft für das Strassenwesen im ÖIVA, Wien, 1980.
2. Lauffer, H.: Forderungen der NÖT an maschinelle Vortriebssysteme, Felsbau 6, Nr. 4, 1988.
3. Hagenhofer, F.: NATM for tunnels with high Overburden, Tunnels and Tunnelling, May, 1990.
4. Ritter, W.: Statik der Tunnelgewölbe, Berlin, 1879.
5. Engesser, F.: Über den Erddruck gegen innere Stützwände (Tunnelwände), Deutsche Bauzeitung, 1882.
6. Wiesmann, E.: Ein Beitrag zur Frage der Gebirgs- und Gesteinsfestigkeit, Schweiz. Bauzeitung, Band 53, 1909.
7. Wiesmann, E.L. ber Gebirgsdruck, Schweiz. Bauzeitung, Band 60, Nr. 7, 1912.
8. Rabcewicz, L.: Aus der Praxis des Tunnelbaus, Einige Erfahrungen ber echten Gebirgsdruck, Geologie und Bauwesen, Jg. 27, Heft 3-4, 1962.

9. Maillart, R.: Über Gebirgsdruck, Schweizerische Bauzeitung, Band 81, Nr. 14, 1923.
10. Mohr, F.: Kraft und Verformung in der Gebirgsmechanik untertage, Deutsche Baugrundtagung, Köln, W.Ernst Verlag, 1957.
11. Müller, L., Fecker, E.: Grundgedanken und Grundsätze der "Neuen Österreichischen Tunnelbauweise", Felsmechanik Kolloquium und Karlsruhe, Trans Tech Publ., Claustal, 1978.
12. Rabcewicz, L.: Gebirgsdruck und Tunnelbau, Springer-Verlag, Wien, 1944.
13. Müller, L.: Der Felsbau, Dritter Band: Tunnelbau, Enke Verlag Stuttgart, 1978.
14. Müller, L.: Der Einfluss von Klüftung und Schichtung auf die Trompeter- Wiesmannsche Zone, 10. Ländertreffen, Int. Büro für Gebirgsmechanik Leipzig, Akad. Verlag, Berlin, 1970.
15. Wissler, E.: Die Gestaltung von Krafthauskavemen nach felsmechanischen Gesichtspunkten, Felsbau 8, Nr. 2, 1990.
16. Myers, A., John, M., Fugeman, I., Lafford, G., Purrer, W.: Planung und Ausführung der britischen Überleitstelle im Kanaltunnel, Felsbau 9, Nr. 1, 1991.
17. Müller, L., Sauer, G., Vardar, M.: Dreidimensionale Spannungsumlagerungsprozesse im Bereich der Ortsbrust, Rock Mechanics, Suppl. 7, 1978.
18. Duddek, H.: Zu den Berechnungsmodellen für die Neue österreichische Tunnelbauweise(NÖT), Rock Mechanics, Suppl. 8, 1979.
19. Pacher, F.: Deformationsmessungen im Versuchsstollen als Mittel zur Erforschung des Gebirgsverhaltens und zur Bemessung des Ausbaues, Felsmech. und lig. Geol., Suppl. 1, 1964.
20. Rabcewicz, L., Golser, J., Hackl, E.: Die Bedeutung der Messung im Hohlraumbau, Teil 1, Der Bauingenieur 47, Heft 7, 1972.
21. Seeber, G., Keller, S., Enzenberg, A., Tagwerker, J., Schletterer, R., Schreyer, F., Coleselli, A.: Bemessungsverfahren für die Sicherungsmassnahmen und die Auskleidung von Strassentunneln bei Anwendung der neuen Österreichischen Tunnelbauweise, Strassenforschung, Heft 133, Wien, 1980.
22. ITA-Richtlinien für den konstruktiven Entwurf von Tunneln, Taschenbuch für den Tunnelbau, Verlag Glückauf, 1990.
23. Swoboda, G.: Finite Element Analysis of the New Austrian Tunnelling Method, 3rd Int. Conf. on Num. Methods in Geomechanics, Aachen, 1979
24. Wanninger, R.: New Austrian Tunnelling Method and Finite Elements, 3rd Int. Conf. on Num. Methods in Geomechanics, Aachen, 1979
25. Rabcewicz, L.: Die Neue Österreichische Tunnelbauweise, Entstehung, Ausführungen und Erfahrungen, Der Bauingenieur, 40. Jg., Heft 8, 1965.
26. Sauer, G.: Theorie und Praxis der NÖT, Tunnel 4, 1986.
27. Austrian National Committee of the ITA: In defence of NATM(Communication), Tunnels & Tunnelling, June 1986.
28. Hessen, J.: Wissenschaftslehre, Lehrbuch der Philosophie, Erasmus-Verlag, München, 1947.