

노르웨이의 암석굴착 기술

김민규

Norwegian Rock Excavation Technology

Min-Kyu Kim

ABSTRACT Norway has the geological of condition of hard bedrocks, high mountains, deep valleys and fjords. In this background many tunnels and rock caverns are developed. In this process of constructing tunnels and rock caverns Norway seems to have strong competitiveness in the construction of tunnels. In spite of high salaries to the tunnel workers, Norwegian contractors are probably producing the cheapest tunnels and rock caverns in the world. Besides benefit of hard-rock geology, Norwegian cost-saving is owing to the Norwegian excavation technique in hard rocks such as unlined pressure tunnels, air cushion chambers, underwater piercing, and reasonable contract system and organization of workers developed from the accumulated experience. Brief analytical description of them are given in this paper in order to stimulate the utilization of the underground spaces.

Key word : Norwegian cost-saving, unlined pressure tunnels, air cushion chambers, underwater piercing, contract system, organization of workers

초 록 : 노르웨이의 지질은 굳은 기반암, 높은 산악, 깊은 계곡과 피요르드로 특징 지을 수 있으며 이러한 지질학적 특성을 배경으로 많은 터널과 암반공동이 개발되었다. 터널 굴착에 종사하는 근로자들의 인건비가 매우 높음에도 불구하고 노르웨이는 이러한 터널과 암반공동의 건설에서 세계에서 가장 높은 경쟁력을 유지하고 있다. 기반암이 견고하다는 지질적인 장점 외에도 노르웨이가 저렴한 가격으로 굴착을 할 수 있는 요인은 무지보압력수로 터널, 압기완충공동, 수중관통발파와 같은 암반굴착기술의 혁신과 합리적인 계약체계, 축적된 경험으로부터 발전된 효율적인 작업 팀의 구성 및 작업방식 등이다. 본 논문에서는 지하공간 활용을 증대시킬 목적으로 노르웨이의 굴착기술을 분석하였다

핵심어 : 노르웨이, 무지보압력수로 터널, 압기완충공동, 수중관통발파, 계약체계, 작업팀구성

1. 서 론

노르웨이에서는 지하를 개발하여 원유, 가스, 식품을 저장하고 오수처리 등의 혐오시설들을 지하화하고 있다. 노르웨이에는 4,000 km의 도수로 터널, 200여 개의 지하수력 발전소, 800여개의 도로터널과 700개가 넘는 철도 터널이 있으며 매년 평균적으로 수력발전소 건설에 수반되는 도수로 터널 100~150 km, 도로 터널 15~20 km를 굴착하고 있다. 이와 같이 풍부한 물량을 배경으로 시공업체들은 서로 경쟁을 하면서 공사비를 절감할 수 있는 방식을 개발하여 왔다(Broch, 1993). 그래서 노르웨이의 높은 인건비에도 불구하고 터널과 암반공동 굴착에서는 높은 경쟁력을 유지하고 있다. 이러한 경쟁력은 노르웨이의 기반암이 견고한 장점을 십분 활용한 것

이지만 이 외에도 무지보압력수로 터널(unlined pressure tunnels), 압기완충 공동(air cushion chambers), 수중관통발파(underwater piercing), 합리적인 계약체계, 능률적인 작업 방식 등의 기술혁신을 통하여 이루어진 산물이다. 다음의 본문에서는 이를 간략하게 분석하여 국내의 굴착 관련 전문가들에게 소개하고자 한다.

2. 국가간의 터널 시공비 비교

다른 나라들 간의 터널 시공비를 비교하는 일은 건설비에 영향을 주는 요인들이 다양하여 간단하지 않다. 이

1)정회원, 한국자원연구소 책임연구원
접수일 : 2000년 3월 6일
심사완료일 : 2000년 6월 2일

Table 1. Construction costs of road tunnels (in 1996 prices).

국 가	터널종류	가격 (1996년기준)		단면적(m ²)	지질조건	인용처
		US\$/m	US\$/m ³			
노르웨이	해저터널	7,020	140	50	노르웨이전역(굳은 암반)	Palmstøm A, 1991 Øvstedal E, 1986
	도로터널	4,160~16,640	92~370	40~50		
오스트리아	Arlberg 산악터널	47,700	463	103	화강암, 운모편암 (파쇄대가 있음)	Steiner W, 1979
	Gleinalm 산악터널	15,500	184	84	화강암, 편마암	
미국	Eisenhower 산악터널	87,500	650	135	화강암, 편마암 (단층대가 있음)	미국전역 Done Rose, 1991
	전단면굴착터널	-	73522	-		
	발파굴착터널	-	160~657	-		
베트남	도로터널	5,000~13,500	172~255	20~80	베트남전역(견고한 암반)	베트남 건설부 소속 기술자와 면담, 1997
한국	도로터널	12,000~20,000	150~230	80~85	한국전역(견고한 암반)	국내건설 기술자와 면담, 1977

Table 2. Consumers price index and wages (From Statistics of IMF, 1996).

국 가	물가상승률				물가상승률 ('90~'93)	달러대비환율 (1996년)	월 평균임금 (US\$, 1996년)
	'78	'84	'90	'96			
미국	79	126	159	184	4.00	1 US\$	3,250
오스트리아	91	123	141	163	4.00	10.42 SCH	2,637
노르웨이	86	146	209	262	9.00	7.06 NOK	4,487
한국	-	138	184	282	9.75	800 WON	1,708

러한 요인들에 중요한 것들은 지질 조건, 건설 절차, 건설 자재와 터널의 기하학적 형상 등이다. 그리고 나라별로 노동 조건과 세금 체계가 다르기 때문에 이 요인들도 건설비를 비교할 때 반드시 고려해야 하는 요인들이다. 무엇보다도 나라마다 자연적으로 주어지는 지질조건이 다르다는 점이 직접적인 건설비의 비교를 어렵게 한다.

Table 1에 우리나라, 미국, 오스트리아, 노르웨이 그리고 베트남에서 소요되었던 터널 건설비를 정리하여 수록했다. 비교 대상 터널의 단위 길이 당 건설비용과 단위 체적 당 건설비용을 같이 제시하였다. 여기에 수록된 자료들은 기 발표되었던 논문에서 다시 정리하였거나 관련국의 전문가와 면담을 통해 얻은 것들이다. Table 1에서 주어진 건설비용은 Table 2에서 주어진 물가 상승률 및 환율을 적용하여 1996년의 비용으로 계산하였으며 단위는 미국 달러화이다.

노르웨이에서는 터널 길이 1m 당 15,000에서 60,000 NOK의 건설비가 소요되며(Øvstedal, 1986), 특히 해저 터널에 소요되는 건설비는 터널 길이 1m 당 4,600에서 10,000 US\$가 소요된다(A. Palmstrøm, 1991). 특정한

나라에서 단위 길이 당 건설비를 좌우하는 요소는 지질 조건이다. Fig. 1은 노르웨이 지질조건에 따라 결정되는 지보의 정도에 따라서 변화하는 터널 시공비를 제시한 그림이다. 이 그림에서 터널의 지보 정도에 따라 터널 건설비가 무려 5배 이상 차이가 나는 점을 주목해야 한다. Steiner(1979)는 독일 지하철 공사에서의 굴착비를 미국의 경우와 비교한 후 미국이 독일보다 약 50~100% 정도 더 비싸며, 미국의 Eisenhower 터널의 건설비는 오스트리아의 Arlberg 터널보다 2.5배 더 경비가 소요되었다고 보고하였다. Steiner(1979)는 이 두 터널은 모두 산악의 도로용 터널인데 독일의 Arlberg 터널의 지질조건이 미국의 Eisenhower 터널의 경우 보다 더 양호하다고 하였다. 필자가 주어진 공사비로부터 물가 상승률과 환율로부터 계산한 결과는 Table 1에 나와 있는데 이 표에서는 미국의 Eisenhower 터널의 건설비는 오스트리아의 Arlberg 터널보다 약 80% 정도 비싸게 계산되었다.

이러한 차이는 비교 시점간의 환율과 물가상승률에 따라 달라질 수 있다. 이 두 나라간의 터널 건설비가 보여

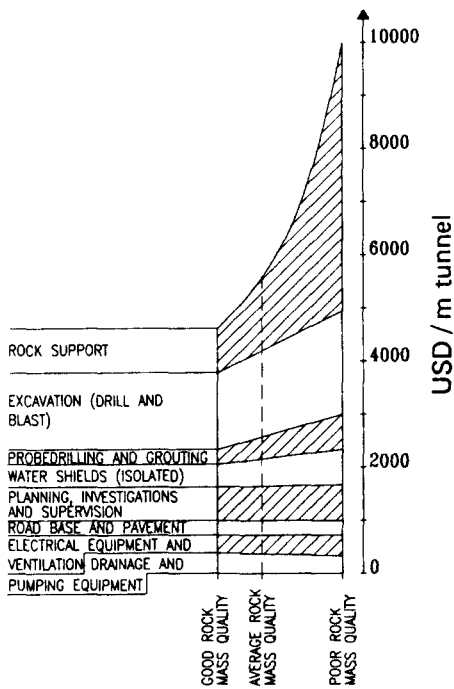


Fig. 1. Total costs of road tunnels, depending on design (1984 prices), from Øvstedal (1986).

주는 차이는 기술과 제도적인 차이에서 비롯된다고 할 수 있다. 주지하듯이 오스트리아에서는 1970년대에 NATM (New Austrian Tunneling Method)을 개발하여 암석의 능동적인 지보능력 개념을 도입하고 지질여건과 계측 결과에 따라 적절하게 지보하면서 채래의 수동식 지보로부터 능동식 지보로 지보 방식을 전환하면서 터널 건설비를 경감시킬 수 있었다. 오스트리아에서 1970년부터 1981년까지 건설된 6개의 고속도로 터널 중에서 1m³ 단위 체적 당 건설비는 Ariberg 터널이 가장 높았고 Gleinalm 터널이 가장 낮았다. 노르웨이 해저터널 평균 건설비 140 US\$/m³으로 보고되고 있는데 이 건설비는 오스트리아 Gleinalm 터널의 건설비보다 약 30% 정도 저렴하다. 일반적으로 오스트리아의 지질조건은 노르웨이보다 좋지 않지만 Ariberg 터널의 지질조건은 상당히 양호하였다고 보고되어 있다.

미국은 매우 보수적으로 터널을 지보하고 있는 것으로 알려지고 있다. 가령 압력수로 터널의 경우 미국에서는 터널의 암질이 아무리 좋아도 전면 콘크리트 라이닝을 해야한다. 노르웨이에서는 지반이 견고한 압력수로 터널에서는 전혀 라이닝을 하지 않는데 이 결과 압력수터

널의 건설비는 노르웨이가 미국보다 약 3배 이상 저렴하다고 알려지고 있다.

우리나라는 노르웨이와 비교할 때 지표면의 풍화대가 많은 것을 제외하고는 기반암에 대한 지질 조건은 유사하지만 터널 건설비는 노르웨이보다 약 50% 이상 비싸다. 1996년도 당시 노르웨이의 임금 수준은 우리나라보다 약 2.5배 이상 높다. 지질조건에서 노르웨이는 풍화대가 거의 없고 지층구조가 복잡하지 않아서 모두 관찰에서 터널 내부의 지질 상황을 거의 정확하게 예측할 수 있기는 하지만 노르웨이가 우리나라보다 더 저렴하게 터널을 공사하고 있는 현실로부터 우리나라가 기술적인, 그리고 제도적인 측면에서 좀 더 개선할 여지가 많다는 것을 알 수 있다.

개발도상 국가인 베트남에서도 터널은 매우 보수적으로 시공을 하면서 거의 예외 없이 전면 콘크리트 라이닝을 한다. 베트남과 우리나라 터널 건설비를 구성하는 내역을 상세히 알 수는 없지만 Table 1을 보면 베트남과 우리나라의 터널 건설비는 거의 비슷한 수준이다. 베트남의 기반암은 고생대의 굳은 암층으로 구성되어 양호한 암질을 보이는 것으로 알려지고 있는 반면 베트남의 근로자 임금 수준은 우리나라보다 수배나 낮다. 그러므로 베트남의 터널 공사비는 우리나라와 비교할 때 인건비에 비하여 상대적으로 높다고 말할 수 있는데 이는 보수적인 건설방식이 양호한 지질조건과 저임금의 혜택을 거의 상쇄시킨 결과라 할 수 있다.

본문에서는 구미 선진국 몇 나라와 개발도상국가인 베트남 및 우리나라의 터널 건설비를 비교하였는데 이상의 논의로부터 노르웨이는 근로자의 임금이 세계에서 가장 높은 나라에 속하지만 이에도 불구하고 가장 저렴하게 터널을 굴착하고 있는 나라라고 말할 수 있다.

3. 지질적 측면

3.1 노르웨이의 지질조건

노르웨이의 지하공간 개발사업이 경쟁력을 유지할 수 있는 주된 이유는 노르웨이의 지질과 지형조건이 지하의 개발에 매우 유리하다는 점이다. 노르웨이는 페르노스칸디안(Ferno-Scandian) 선캠브리아기에 형성된 순상지(shield)의 일부분이다. 대략 전 국토의 2/3가 여러 유형의 편마암이 주류를 이루고 있는 선캠브리아기의 암석으로 구성되어 있고 다른 1/3은 캠브리아, 오도비스기, 사이루리아기에 속하는 암반으로 구성되어 있다. 노르웨이

Table 3. Geological site investigation stages in Norway.

시공전 단계(사전조사)		시공중 단계(사후조사)	
타당성 조사	확정설계 조사	상세 지표조사	터널 매핑
<ul style="list-style-type: none"> · 실내 조사 · 도보지표조사 · 지구물리탐사 	<ul style="list-style-type: none"> · 지질공학적 매핑 · 특수현장 시험 · 시료취득, 실험실 시험 	<ul style="list-style-type: none"> · 시료취득 및 시험 · 보조 조사 · 시공전 조사자료의 검토 및 수정 · 암석지보, 라이닝, 그라우팅, 굴착 방안 제시 	<ul style="list-style-type: none"> · 터널안 매핑 · 암석지보, 라이닝, 암질 개선 조사 기록 · 굴착작업 평가

의 주요한 기반암종은 편마암 이외에도 화강암, 반려암, 규암 등이 있다. 칼레도니아안(Caledonian) 지각운동으로부터 이들 암종의 대부분은 변성되었지만 변성의 정도는 다양하다. 제4빙하기 후반을 거치면서 노르웨이는 오늘날과 같이 높은 산악지대와 거의 풍화되지 않은 기반암 위에 12,000년도 되지 않은 신선한 토양으로 얇게 덮인 지형적인 특징을 갖게되었다.

지질공학적인 측면에서는 노르웨이는 전형적으로 굳은 암반으로 이루어진 지역이지만 단층들은 지하 공동의 안정성에 심각한 영향을 미친다. 노르웨이의 기반암은 빙하의 침식에 의해서 연약면, 단층, 절리사이의 충전물들이 노두에 매우 잘 노출되어 있어 지질조사와 암석표본을 수집하기가 비교적 쉽다.

3.2 지질조사 방식

노르웨이의 지질조사는 유연하고 매우 실제적이다. 노르웨이의 지질조사는 (1) 계획의 전반적인 평가와 터널이나 공동의 위치와 방향을 정하고 이를 평가하기 위한 자료, (2) 안정성 평가, 안정성 해석 및 지보 설계에 필요한 자료, (3) 건설비 산정과 공사 입찰을 위한 준비 자료 등을 취득하는 것이 주된 목적이다.

노르웨이에서 일반적으로 시행되는 지질조사의 네 단계는 Table 3에 제시하였다. 모든 지질조사가 반드시 이 4단계를 다 거치는 것은 아니다. 짧은 터널을 건설하는 경우에는 시공전의 두 단계를 생략할 수도 있다. 여러 개의 터널을 배치하는 지하수력발전소 건설이나 복잡한 해저터널의 건설에서는 시공전의 두 단계를 다시 여러 단계로 세분하기도 한다.

모든 지질조사 결과는 반드시 문서화되어 보관되면서 지하 시설을 설계하거나 운영하는데 적용된다. 노르웨이에서 현재 널리 이용되고 있는 Q-암질분류법, 건설비를 산정하는 예측 모델과 중요한 굴착기술들은 이렇게 기록되고, 보존된 문서들을 통하여 성취될 수 있었다.

4. 경영적 측면

4.1 터널 기획: 터널 건설비 예측 모델

터널공사의 난이도는 암질, 암석 강도, 절리의 발달 정도 등과 같은 지질공학적인 변수와 적용되는 장비들에 좌우된다. 암석 조건이 양호하면 시간당 10m 이상 굴진하기도 하지만 암질이 불량하면 굴진 속도는 시간당 수십 cm에 불과한 경우도 발생한다. 지질적 요인 외에도 굴착 속도는 공사가 이루어지는 위치, 인건비, 전력비 등과 같은 다른 요인과 더불어 공사비에 큰 영향을 미친다.

노르웨이에서는 오랫동안 지질자료, 공사기간, 작업공정과 소요된 비용들에 대한 상관성을 체계적으로 분석한 터널링 자료들이 축적되어 왔다. 노르웨이에서 터널 건설 비용을 예측하는 모델은 터널공사와 지질 변수들 사이에 성립된 상관성을 분석함으로써 성립되었다. 계획되고 있는 터널에 대한 자료들이 수집되면 터널 건설비 예측 모델을 적용하여 건설비용과 공사기간에 대한 평가를 할 수 있다. 이 뿐 아니라 이 모델을 적용하여 전단면 굴착에서 전단면 굴착기의 순간 추력, 커터의 직경과 회전 속도와 같은 기계변수를 최적화 시킬 수 있다. 1970년대 중반에 터널 건설비 예측 모델이 도입된 이후 노르웨이는 계속해서 이 모델을 수정하고 개선시켜 왔는데, 현재 노르웨이에서는 기획 단계에서 터널 비용과 공사의 난이도를 평가하는데 이 비용예측 모델을 적용하는 것이 일반화되어 있다.

전단면 굴착에서 비용을 좌우하는 요인들은 대단히 많다. 노르웨이 기술공과대학에서 개발된 NTH 건설비 예측 모델에서는 수 개의 실험식들을 적용하여 표준가격(normalized cost)을 정의하였다. 이 표준가격은 전단면 굴착기 가격, 분쇄와 조립 비용, 폐석 처리 작업, 커터 비용, 운반비, 인건비 등의 제조소를 종합하여 얻어지고, 대부분이 터널의 단면과 터널의 경로를 결정하는데 사용된다.

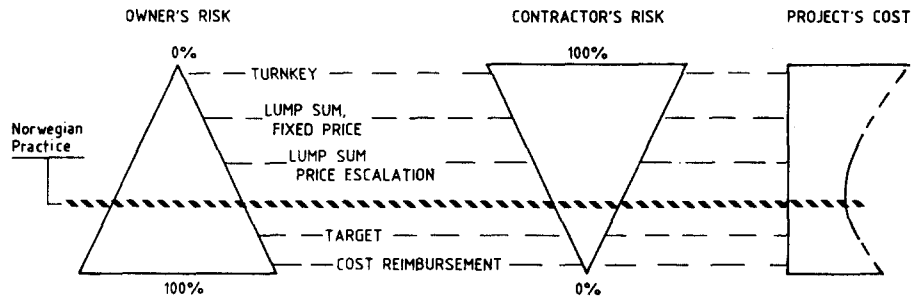


Fig. 2. Risk sharing according to type of contract, and assumed influence on project costs, from Kleivan (1988).

4.2 계약 방식: 조건부 단가 정산제

아무리 상세하게 지질조사를 하더라도 예측되는 암반 지질과 계획하는 지보의 방식과 양에서 어느 정도의 불확실성은 항상 존재하기 마련이다. 그래서 터널과 지하굴착 공사에서는 공사의 계약 방식이 매우 중요하다. 노르웨이에서는 안전을 추구하고 건설비를 효율적으로 책정하기 위하여 이 지질적인 불확실성에서 위험을 분담하는 계약 방식을 적용하고 있는데 이 계약 방식은 대략 1970년대 중반부터 도입이 되었다. Fig. 2는 계약 방식에 따라서 건설비와 위험도가 어떻게 분배되는 지를 보여준다.

노르웨이에서는 대체적으로 공사의 규모에 의해 결정되는 운송비, 장비비 및 장치비와 같은 초기의 비용을 포함하여 공사 중 발생하는 비용에 대해서 "조건부 단가 정산제(unit price contracts with lump sums)"로 계약을 한다. 예를 들어 지하수가 유입되면 이에 대한 배수 비용은 조건부 정산제에 의해 지불되는데 각 터널의 말단에서 측정된 지하수의 유입량에 따라 지불 비용이 달라지게 된다. 현지의 사정에 따라 조건부 정산을 하게 되면 최종 공사금액은 당초 계약 금액의 10%에서 20% 정도로 늘어날 수 있다. 이때 적용되는 규정 단가(unit price)는 각각에 대해 합리적이고 적합하게 정해진다. 조정비용(lump sums)은 청구되는 단가의 총합이 계약금액보다 15~20% 이내를 벗어나지 않으면 일정하게 지급되고 이를 넘어서면 추가되는 청구에 대해서는 일정한 비율로 조정된다. 조건부 정산제를 시행하면서도 소송이 제기될 수는 있지만 그런 경우는 시공자가 감당할 수 없는 비용의 증액이 발생하는 경우에 국한된다.

공사단가를 결정함에 있어 시공기간은 시공자의 이익에 매우 중요할 수밖에 없다. 터널 막장에서 즉시 처리되어야 하는 작업의 양은 굴진율에 직접 영향을 미친다. 이에 대응하여 "표준작업시간제(equivalent construction

time system)"가 도입되었는데 이 내용도 계약하는 공사에 따라서 언제나 조금씩 차이를 두게 되는데 발주자의 고문기술자들에 의해 결정되어 약정될 수도 있고 시공자가 입찰에서 이를 명시할 수도 있다. 노르웨이의 모든 터널공사 계약에서는 탄력적인 규정 단가제를 적용하는 것이 원칙으로 되어 있다. 계약에서 모든 단가는 조사 결과와 공사전반의 기획에 근거하여 발주자 혹은 발주자측의 고문 기술자에 의해서 가능한 한 정확하게 약정된다. 암반의 조건이 돌변하여 예상된 작업량을 벗어날 경우를 보상하기 위해 모든 지보 작업에 대해서도 표준시간을 적용한다. Table 4는 노르웨이 수력발전소 건설에서 적용된 표준시간을 보여주는 한 예이다. 발주자와 시공자는 약정된 표준단가제를 도입하여 암질 조건과 작업 공정에 따라 최종 비용을 손쉽게 계산한다.

노르웨이에서 이와 같은 위험분산 계약 제도인 "조건부 단가정산제"가 일반화되면서 약 2,000 km 이상 터널을 굴착하였지만 이와 관련하여 소송이나 중재를 필요로 하는 경우가 한 건도 보고된 적이 없었다고 한다 (Kleivan, 1988 and Dahl, 1986).

4.3 작업조 구성 및 공정 관리

노르웨이의 도로터널은 주로 발파방식에 의해 이루어 지는데 그 일반적인 과정은 다음과 같다.

(1) 막장에서는 2~3명이 한 조를 이루어 각 교대 당 천공, 장약, 발파, 천정고르기, 폐석처리, 볼트시공, 철망 연결 시공, 슛트크리팅, 프리그라우팅(pregrouting)을 한다. 대개는 4 km 이내에 다른 막장이 있는 경우가 흔한데 이럴 경우 새 갱도가 굴착되면 교대 당 3명으로 조를 구성하고 두 막장을 번갈아 가면서 천정고르기와 폐석처리를 제외하고 동일한 작업을 하게된다. 이 두 작업은 다음 조가 맡게된다. 그러면서 각 터널이 1.5 km 이상 굴진되면 각 막장에 별도의 천공장비를 각각 배치한

Table 4. Typical time equivalents for medium size hydraulic tunnels (from Nilsen et. al., 1993)

작업	소요시간
부분 볼팅	볼트 10개당 0.2교대시간 (shift)
시스템 볼팅	볼트 10개당 0.15교대시간
보강 슛트크리팅	10 m ² 당 0.3 교대시간
스�트크리팅 장비 이동 배치	1회당 0.15 교대시간
아치형 콘크리트 라이닝	10 m ² 당 6교대시간
콘크리트 라이닝 장비 배치	1회당 0.25 교대시간

다.

(2) 막장에서의 낮 교대조는 조장, 지질공학 기술자 혹은 지질기사 1인이다가 기계공, 전기공, 환기와 배관 관리공으로 구성되며 필요시 콘크리트와 폐석을 분쇄하는 장치 관리인이 더해진다.

노르웨이에서 야간 작업조는 1977년에는 법에 의해 폐지되었고, 현재 지하 작업에서의 근무시간은 주당 36시간으로 줄어들어 한 주에 10 교대로 72시간 작업을 한다. 교대 당 1.5회의 발파를 하며 굳은 암반에서는 주당 60m를 굴진하나, 발파 후 전면 콘크리트 라이닝을 해야하는 연약한 암반에서는 주당 20m 이상 굴진하기가 어려울 때도 있다. 공기(工期)가 대단히 중요한 공사에서는 주당 근무 시간이 100시간으로 연장할 수 있는데 이 경우는 작업조를 3개로 구성해야하며 따라서 인건비 외에도 속삭비가 50% 이상 증가하는 등 터널 공사비가 급증하게 된다. 노르웨이의 경험에서는 교대 시간을 통상적인 7.5시간보다 늘리게 되면 작업 생산성이 떨어진다고 보고하였다. 노르웨이의 터널 근로자들은 이와 같이 전문성이 높고, 다재다능하며, 고정급에다가 작업성과에 비례하여 성과급을 받는다. 이와 같이 노르웨이 터널 근로자들의 생산성은 매우 높은 반면 임금은 다른 야외 근로자들에 비해 두 배정도 높다(Dahl, 1986).

5. 기술혁신

5.1 지하 수력발전소와 무라이닝 압력수로 터널

노르웨이에서는 연 100 Twh 발전량 중에서 99% 이상이 수력발전이다. 이전에는 지상에 수력 발전소를 건설했지만 현재는 지하에 수력발전소를 건설하는 것이 일반화되었는데 이는 지하발전소 건설이 가장 저렴하기 때문이다. 이 외에도 지하 수력발전소는 전쟁이나 테러 등으로부터 안전하고 눈에 보이지 않아서 환경을 가장 적게

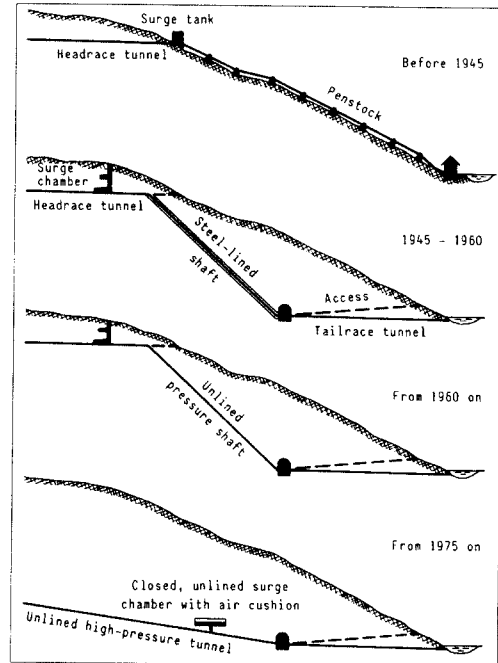


Fig. 3. The Development of the general layout of hydro-electrical plants in Norway, from Broch (1994).

저해하는 시설이라는 장점이 있다. 지하 수력발전소를 건설하는 초기에는 지하발전소의 천장과 벽을 별도로 처리하고 어느 정도 치장을 하였지만 현재에는 내부의 암석 자체를 그대로 둔다. 이를 위해서는 정밀하게 천공과 발파를 해야하고 안정된 암반을 선택해야 한다.

Fig. 3은 수력발전소의 개발 역사를 보여주는 개략도이다. 처음에는 지표면에 발전소를 건설하였지만 암반 자체의 지보력에 대한 확신이 생기면서 발전소를 지하의 암반 속에 건설하게 되었다. 원래 지표에 설치되던 도수관은 처음에는 라이닝을 한 압력수로터널로 대체되었고 이후 다시 라이닝을 하지 않은 압력수로터널로 바뀌었다. 1994년까지 수두가 150m를 상회하면서도 수갱과 압력수로터널을 라이닝하지 않고 건설되어 가동 중인 지하발전소가 80개 이상인 것으로 알려지고 있는데 이 중에서 정수두가 500m 이상인 것도 15개소나 된다. 1994년 무렵에는 정수두가 1000m를 넘어서면서도 라이닝을 하지 않은 압력수로터널과 연결된 지하 수력발전소가 가동되기 시작하였다.

무라이닝 개념에서는 철근과 콘크리트는 더 사용되지 않으며 암석 자체로만 높은 수압을 이겨낸다. 지하의 안정성과 압력수의 기밀성을 엄격하게 보장하기 위해서는

입지를 선정할 때부터 여러 가지 공학적인 요소들이 고려되어야만 한다.

5.2 무라이닝 압기완충 공동(Unlined air cushion surge chambers)

라이닝을 하지 않은 압기완충 공동은 노르웨이가 개발한 가장 근래의 대표적인 기술혁신이다. 1973년 Driva 수력발전소에 처음으로 압기완충 공동이 시설되어 가동된 이래 1994년까지 10여개의 무라이닝 압기완충 공동이 건설되었다. 이전에는 경사진 압력도수로 터널의 정상에 대기 중으로 열려있는 수갱을 설치하여 돌발적인 압기를 완화시켰지만 이제는 필요에 따라 이 시설들을 압기완충 공동으로 대신할 수 있게 되었다. 여기서는 압축공기가 지하공동의 40~80%를 점유하면서 터빈의 작동 개시, 정지 혹은 급격한 회전의 변화 등 발전에서 수반되는 돌발적인 수압 충격을 흡수시키는 역할을 하게 된다. 이 압기완충 공동이 노르웨이가 가장 먼저 개발된 이유는 노르웨이의 지형적 특성 때문이다. 압력도수로 정상에 수갱을 설치하기가 매우 어려운 정도로 지형이 높고 험할 경우 이 압기완충 공동은 훨씬 저렴한 대안이 된다. 일

례로 1987년 완공된 노르웨이 Kvilldal 수력발전소 건설에서 이 압기완충 공동을 시설함으로써 재래적인 수갱 시설보다 약 3천만 NOK(약 5백만불) 정도의 비용을 절감할 수 있었다고 보고되었다(Dahlø, 1988).

무라이닝 압기완충 공동에서는 압력수와 압기가 누출되지 않도록 하기 위해서는 공동 안의 공기압 혹은 수압보다 암반중의 최소 주응력이 더 커야하고 동시에 공동 주변 암반의 지하수압이 공동 내의 공기압보다 더 커야 한다. 만일 수리학적 조건이 이를 충족시키지 못하면 암반 주위에 수막(water curtain)을 설치하여 인위적으로 공동 암반 주위의 수압을 높여야 한다. Fig. 4는 수막을 설치한 압기완충 공동의 예이다.

5.3 수중관통 발파(underwater piercing)

수중관통 발파는 터널과 호수 혹은 해저면을 연결시키기 위해 호수 혹은 해저바닥에 근접한 터널의 막장을 최종적으로 발파하는 일련의 과정이다. 주로 수력발전의 도수 터널을 호수 바닥으로 관통시킬 때 적용이 되지만 수력발전소나 오수 처리장의 배수로 터널을 호수나 바다로 연결시킬 경우에도 적용된다. 수중관통 발파는 지난 약

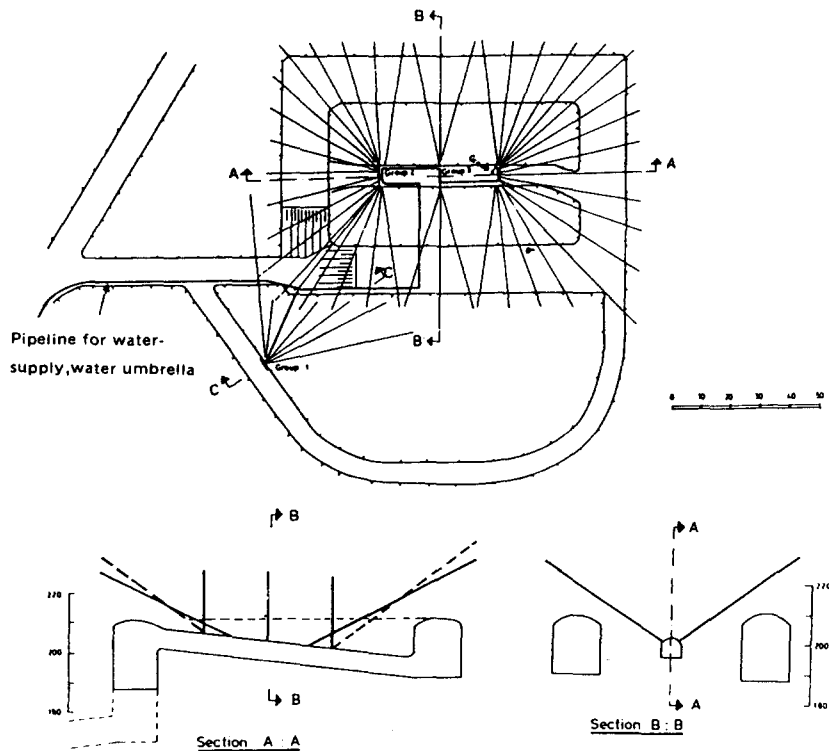


Fig. 4. Plan and profile of the Kvilldal chamber, from Pleym et al. (1985).

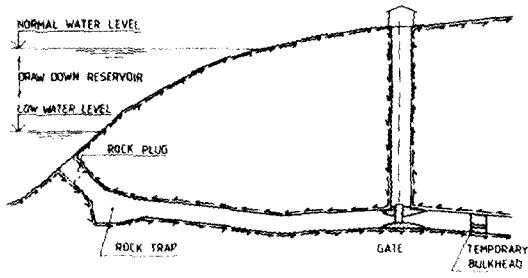


Fig. 5. Typical layout for a underwater piercings, from Bjorn Buen (1988).

90년 동안 노르웨이의 실제 공사에 적용되어온 기술로 1994년까지 약 500~600회, 이중에서 1980년대 이후에는 약 70회 정도가 시행되었다고 보고되고 있다(Bjorn Buen, 1987). 근래에는 해저 105m, 단면 95m²의 터널에서 관통 발파가 이루어진 적도 있다. 노르웨이의 호수바다 관통 발파는 경제적인 그리고 지형적인 두 가지 측면과 연관되어 있다. 자연적으로 형성된 작은 호수들이나 인공적인 댐을 축조하여 형성되는 작은 호수들의 바닥을 도수로 터널로 관통시켜서 물을 모으면 큰 저수지를 만들 수 있다는 경제적인 측면과, 높은 계곡과 산악에 수많은 작은 호수가 있는 노르웨이의 지형적인 장점을 결합시켜 개발된 기술이 수중관통 발파이다.

수중관통 발파의 절차는 터널시스템 설계, 터널의 굴착, 최종 발파설계 및 발파로 이루어진다(Berdal et al., 1985). Fig. 5에는 수중관통 발파의 개략도를 소개한 그림이다. 수중관통 발파에는 발파 직후 형성되는 공기 압력을 수갱을 통해 대기로 개방시키는가 아니면 갱구를 막아서 밀폐시키는가에 따라 개방식과 밀폐식 수중관통 발파로 나누어진다.

6. 결 론

터널이나 암반공동의 건설비에 영향을 미치는 요소는 여러가지이기 때문에 다른 나라들 간에 이를 정확하게 비교하기는 쉽지 않다. 그럼에도 불구하고 본 논문에서는 우리나라, 미국, 유럽, 노르웨이, 베트남에서의 터널 건설비를 비교하여 대략적이나마 노르웨이의 터널굴착 경쟁력을 입증하였다. 이러한 노르웨이의 암반굴착 경쟁력은 이 나라의 높은 임금수준에도 불구하고 경영과 기술혁신의 측면에서 가능하였고 본 논문에서 이에 대하여 간략하게 분석하고 설명하였다. 나라들마다 지질조건, 법과 제도가 달라서 노르웨이의 경우를 일반화 할 수는 없다고 본다.

주지하다시피 우리나라는 국토의 70%가 산지이고 도로 개설, 주거 및 산업공간으로서 지하의 굴착에 대한 수요는 지금도 그러하고 앞으로도 더욱 확대될 것이다. 더구나 우리나라는 기반암이 노르웨이처럼 견고하다는 공통적인 지질환경을 갖고 있어서 노르웨이의 경영, 제도, 기술적인 측면을 잘 이해하고 이를 우리의 실정에 맞게 수용할 수 있다면 우리나라도 현재보다 더욱 저렴한 가격으로 터널을 굴착하고 지하공간을 개발하여 활용할 수 있으리라 기대한다.

참 고 문 헌

1. Pley A. and Stokke O., 1985, Operational Experiencing with the Air Cushion Surge Chamber at Kvilldal Power Station, In: Norwegian Hydropower Tunnelling, Publ. No.3, NSREA
2. Berdal B., 1985, Lake tap-Norwegian method, In: Norwegian Hydropower Tunneling, Publ. No. 5, NSREA (Norwegian Soil and Rock Engineering Association), Tapir, 115-119.
3. Bjorn Buen, 1988, Lake Taps, In: Norwegian Tunnelling Today, Publ. No.5, NSREA, Tapir, 91-92.
4. Broch Einar, 1993, Use of the underground in Norway, In: Norwegian Underground Storage, Publ. No. 9, NSREA, Tapir, 9-11.
5. Dahl K. O., 1986, Norwegian Tunnelling Experience as a Background to the Low-Cost Concept of Road, In: Norwegian Road Tunneling, Publ. No 4, NSREA, Tapir, 33-43.
6. Dahlø, T., 1988, Experience from air cushion surge chamber, In: Norwegian Tunnelling Today, Publ. No. 5, NSREA, Tapir, 77-78.
7. Don Rose, 1991, Cost Estimating for Underground Structures, In: Underground Structures Design and Construction, Elsevier, 480-515.
8. Kleivan, E., 1988, NoTCoS-Norwegian Tunnelling Contract System, In: Norwegian Tunnelling Today, Publ. No. 5, NSREA, Tapir, 67-72.
9. Nilsen B. and Thidemann A., 1993, Rock Engineering, Norwegian Inst. of Tech. Div. of Hydraulic Eng, 135p
10. Palmstørm A., 1991, Introduction, In: Norwegian Subsea Tunnelling, Publ. No. 8, NSREA, Tapir, 9-10.
11. Steiner W. et al., 1980, Improved Design of Tunnel Support, Vol. 4, Tunneling Practices in Austria and Germany, 17-36
12. Øvstedal E., 1986, Standard and Costs of Norwegian Road and Tunnels, In: Norwegian Road Tunnelling, Publ. No. 4, NSREA, Tapir, 19-26.

김민규



1981년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사

1984년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학석사

1992년 서울대학교 대학원 자원공
학과, 공학박사

Tel : 042-868-3246

E-mail : mkkim@rock25t.kigam.re.kr

현재 한국자원연구소 책임연구원
