

경제성 분석에 의한 싱글셸 터널의 국내 적용성 검토 연구

김학준^{1*}, 신휴성²

Applicability of the single shell tunnel in Korea from the economic evaluation

Hak-Joon Kim, Hyu-Seong Shin

Abstract The construction cost for the single shell tunnel is cheaper than that of the double shell tunnel according to the case studies performed in several domestic and foreign tunnels. However, the economic advantage of single shell tunnel drops drastically as the condition of the rock mass deteriorates. Therefore, the single shell tunnelling method should be applied to the good rock mass conditions. The application of the single shell tunnelling method to tunnels in Korea should be determined considering the ratio between the good rock and poor rock masses along the tunnel section. The use of the single shell tunnel is expected to extend depending on the cheap supply of high quality shotcrets and rock bolts developed for single shell tunnels.

Keywords: Single shell tunnel, tunnel construction cost, shotcrete

요 지 터널공사비에 대한 국내외의 사례 조사 결과 싱글셸 터널은 기존의 콘크리트 라이닝을 설치하는 이중셸 터널에 비하여 공사비가 저렴하였다. 그러나 암반 상태가 불량해 질수록 싱글셸 터널의 경제성은 급격히 저하되었다. 따라서 싱글셸 공법은 암반상태가 양호한 지반에 적용해야 한다. 국내의 경우 일반적으로 여러 암반 등급이 다양하게 나타나므로 양호한 암반과 불량한 암반의 비율을 고려하여 싱글셸 공법의 적용 여부를 판단해야 한다. 싱글셸에 이용되는 슛크리트 및 록볼트는 영구지보재로서 고품질이어야 하므로 지보재료의 저렴한 공급여부에 따라서 싱글셸 공법의 적용 대상 암반이 확대될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 싱글셸 터널, 터널공사비, 슛크리트

1. 서 론

1980년대 초 NATM(New Austrian Tunnelling Method) 공법이 유럽으로부터 국내에 도입되면서 국내 교통터널은 지반 굴착 직후 타설되는 슛크리트 라이닝층과 터널 관통 후 타설되는 2차 콘크리트 라이닝이 중간 방수시트로서 서로 분리되는 이중구조의 라이닝 체계로 설계되어 시공되고 있다. 국내 NATM 공법에서 콘크리트 라이닝의 역할 및 필요성은 지반상태에 따라 구별된다. 연약지반에서의 콘크리트 라이닝은 구조체의 역할을 담당하는 것으로 판단될 수 있지만 지하수가 거의 유출되지 않고 암반조건이 매우 양호한 산악터널의 경우에는 과도한 공사비 책정의 근본 원인이 될 수 있다(이두화 등 2001, 정형식 등 2001). 황학 등(2001)에 의하면 무지보로 건설 가능한 현장에서 지반특성을 고려치 않고 2차 콘크리트 라이닝까지 시공하게 되므로 굴착기간의 약 30%정

도에 해당하는 추가 공사기간이 소요된다. 그러나 국내의 경우에는 암반상태가 매우 양호한 경우에도 콘크리트 라이닝을 반드시 타설하고 있어 그 필요성에 대한 논란이 계속되고 있다.

노르웨이(신희순, 2001), 독일(Haack, 1988), 일본(JTA, 1988; 지오프론트 연구회, 2000) 등의 터널 기술 선진국들에서는 경제적인 터널시공을 위하여 싱글셸 터널공법을 도입하여 일체화된 터널 라이닝을 적용하고 있다. 이러한 싱글셸 라이닝은 기존 NATM개념에서의 슛크리트의 역할과 콘크리트 라이닝의 역할을 함께 수행하면서 균질하지 않은 각 층간에 전단력이 전달되는 구조특성을 갖게 된다. 따라서 같은 투입재료 재원으로 총 라이닝 두께를 줄일 수 있으며, 총 공사비에 크게 영향을 미치는 공기를 단축시킬 수 있는 여건을 마련할 수 있다.

국내에서도 싱글셸 공법에 대한 관심 및 필요성이 증가하여 이 분야에 대한 연구(신휴성 등, 2006; 한국건설기술연구원, 2006)가 활발히 진행되고 있으며 싱글셸 공법에 필요한 고강도, 고내구성의 슛크리트와 록볼트에 대한 개발(박해균 등, 2003; 배규진 등, 2004; 배규진

¹대전대학교 지반설계정보공학과 교수

²한국건설기술연구원 지하구조물연구실 선임연구원

*교신저자: 김학준 (hakkim@dju.ac.kr)

등, 2006)도 수행되고 있다.

최창림 등(2006)은 절리가 적은 양호한 암반에서는 콘크리트 라이닝이 불필요함을 지적하였으며 국내 대부분의 터널 기술자들도 이에 동의하고 있다. 국내 지하비축기지의 경우에는 정밀 지반조사를 통하여 심부의 암반상태가 양호한 구간을 선정하여 공사가 수행되므로 콘크리트 라이닝의 생략이 가능하다. 그러나 국내의 일반 도로나 철도터널의 경우, 여러 등급의 암반이 함께 나타나므로 양호한 암반과 불량한 암반의 비율을 고려하여 싱글셀 공법의 적용 여부를 판단해야 하므로 싱글셀 공법에 대한 경제성 분석이 필요하다.

본 연구에서는 싱글셀 라이닝 공법을 국내에 적용하기 위해 준비되어야 하는 다양한 재료적 역학적 고찰에 앞서, 보다 단순화된 공정의 싱글셀 라이닝 공법이 적용되었을 때 기존 터널에 대비하여 확보될 수 있는 경제적 이점을 분석하여 싱글셀 라이닝 공법의 국내도입을 위한 경제성을 평가하고자 한다. 현재 국내 교통터널의 경우 싱글셀 개념으로 시공된 사례가 전무한 상태이므로 국외 암반등급별 싱글셀 및 NATM 공사비 관련 자료와 국내 NATM 공사비 자료를 활용하고, 분석 방법론과 기본 분석개념은 외국 사례를 기초로 국내의 실정을 고려하여 분석을 수행하고자 한다.

2. 국외 싱글셀 터널의 경제성 평가

2.1 노르웨이 싱글셀 터널의 경제성 평가

싱글셀 지보 비용은 Q값과 밀접하게 연관되어 있다. Q값은 1회 발파에 의한 굴진장에 직접적인 영향을 주며 따라서 터널 굴진속도가 달라진다. 또한, Q값에 따라 필요한 볼트의 양과 길이, 강섬유 보강 슛크리트 두께가 달

라지므로 공사비 및 굴진 속도에 영향을 준다. 1회 굴진시의 공정시간도 Q값이 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 즉, 터널건설 속도와 Q값 사이의 밀접한 관계는 발파 굴진장과 소요 지보량의 필요성의 차이에 기인한다. Q값과 굴진 속도와의 관계는 Grimstad & Barton(1993, 1995)에 의하여 상세히 제시되었다.

Barton(1998)은 7 m와 12 m폭의 터널을 대상으로 1998년 수행한 터널 공사비 연구 결과를 이용하여 Q시스템을 직접 적용한 노르웨이 싱글셀 터널의 공사비를 분석하였다. 또한 자료 사용성의 범위를 3차선 도로 터널로 확대하기 위해서 15 m 폭의 도로터널에 대한 공사비 산정 결과도 첨부하였다. 노르웨이 터널공사 비용은 8.0 NOK를 1USD로 가정하여 미화로 계산되었다. 공사비 산정시 표 1과 같은 단가가 가정되었다.

Q값에 따른 발파 비용의 차이는, 실질적으로는 Q값이 낮은 경우 발파 굴진장이 짧게 되어 발파 비용이 차이가 날 것이지만, 계산을 단순하게 하기 위해서 고려하지 않았다. 노르웨이의 건설사들은 위에 제시한 모든 단가에서 현장 준비, 도로, 인부들의 숙소, 이윤 등을 고려하여 1.5~1.65를 곱하여 공사비용을 산출한다. 굴착, 버럭 운반비용, 지보공 및 건설사 이윤 등을 포함하고 사전 주입(pre-injection), 방수, PC-element는 포함하지 않은 최종의 개략적인 공사비는 Barton(1998)에 의하여 그림 1 및 표 2와 같이 제시되었다.

Barton et al.(1992)에 의하면 싱글셀 공법은 단면적 45 m²~110 m²의 터널에서 단위 m당 약 US\$4,000~US\$8,000정도의 공사비가 든다. 일반적으로 NMT(Norwegian Method for Tunnelling) 공법에서는 습식 슛크리트의 반발율이 4-6%로 기존 NATM 보다 낮고 콘크리트 라이닝을 사용하지 않으므로 콘크리트가 상당히 적게 사

표 1. 노르웨이 터널공사 비용 산정에 사용된 단가

공사 항목	단 가
강섬유보강 슛크리트	330 US\$/m ³ (240~360 US\$ 사이)
RRS(Rib Reinforced Shotcrete)	400~700 US\$/unit(12 m, 15 m 폭)
CCA(Cast Concrete Arches)	220 US\$/m ³
볼트	60, 70, 80 US\$/볼트(3 m, 4 m, 5 m 볼트)
spiling	100 US\$/볼트
발파비용	16~20 US\$/m ³
버럭 운반비용	2 US\$/m ³ /km

용된다. 결과적으로 Barton et al.(1992)은 두 공법사이에 상당한 건설비용의 차이가 발생하는데 NMT 공사비용은 NATM 공사비용의 1/2~1/5 정도이고 공사기간도 상당히 단축된다고 보고하였다.

2.2 독일 싱글셀 터널의 경제성 평가

Schreyer(1996)는 뮌헨에서 건설된 지하철에서의 비용 산정으로부터 싱글셀과 기존의 이중셀 터널 공사비를 표 3과 같이 비교하였다. 공사비 산정에 사용된 터널은 약 36 m²의 원형 단면적을 가진 단선 터널이다. 터널 공사비용은 사용된 슛크리트, 콘크리트, 강재 등의 양에 따라 결정되는데 공사비 산정에는 터널을 건설하는데 필요한 직접비용만을 고려하였고 계획, 현장설비 등과 같은 간접비용은 제외하였다. 또한 현장의 일반 부대비용, 전반적인 사업비용, 공사의 위험분담금, 이윤 등은 고려하지 않았다.

표 3에 의하면 싱글셀 터널은 이중셀에 비하여 10-20% 정도의 경비가 절감되는 것으로 추정되었다. 이와 같이

보강 콘크리트로 건설된 싱글셀 라이닝의 비용이 저렴한 이유는 라이닝 두께가 이중셀 라이닝보다 얇다는 것과 따라서 터널 굴착량이 줄어든다는데 기인한다. 표 3

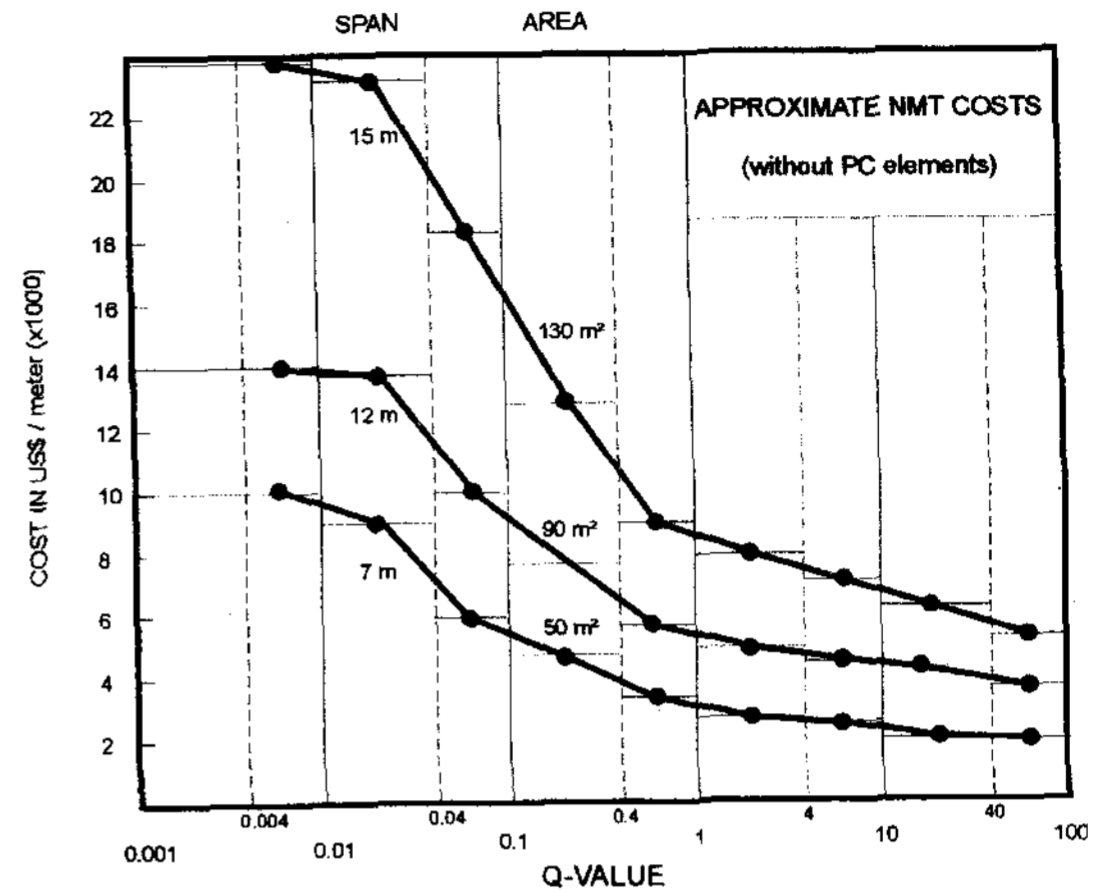


그림 1. Q값에 의해 설계된 도로터널 공사비용의 개략적인 비교

표 2. 최종 추정 공사비(US\$/m)

Q 값의 범위	폭 7 m, 단면적 50 m ²	폭 12 m, 단면적 90 m ²	폭 15 m, 단면적 130 m ²
<0.01	10,240	13,920	24,700
0.01-0.04	9,280	13,600	24,030
0.04-0.1	6,080	10,240	18,990
0.1-0.4	4,960	7,940	13,170
0.4-1	3,440	5,920	9,180
1-4	2,850	5,120	8,240
4-10	2,640	4,640	7,410
10-40	2,080	4,320	6,420
>40	2,010	3,740	5,470

표 3. 독일 싱글셀 터널의 기존 이중셀 터널 대비 공사비 비교

	개략적 비용	비고
이중셀 터널 일차 층: 15 cm 슛크리트 이차 층: 40 cm 콘크리트	100%	철근보강 콘크리트 라이닝
싱글셀 터널 일차 층: 15 cm 슛크리트 이차 층: 15 cm 슛크리트	80%	라이닝 하중과 수압이 작은 경우
싱글셀 터널 일차 층: 15 cm 슛크리트 이차 층: 10 cm 슛크리트 삼차 층: 10 cm 슛크리트	90%	라이닝 하중과 수압이 작은 경우

의 계산에서는 싱글셀 라이닝의 유지보수비는 포함되지 않았다.

Schreyer에 의한 독일 터널에서의 싱글셀에 대한 공사비 비교는 노르웨이에서 사용되고 있는 로봇 분사기를 이용한 강섬유 보강 슛크리트를 고려하지 않았고 암반상태도 상대적으로 불량하여 절감 경비가 상대적으로 크지 않은 것으로 판단된다.

2.3 일본 싱글셀 터널의 경제성 평가

지오프론트 연구회(2000)는 싱글셀 터널의 적용성을 검토하기 위하여 공사기간 및 공사비에 관하여 NATM 터널과의 비교를 실시하였다. 지반조건은 Q값은 0.3~1.0이며 터널단면적은 80 m², 연장은 500 m이었다. 굴착 공법은 NATM은 보조 Bench가 붙은 전단면 굴착, 싱글셀 공법은 전단면 굴착으로 하였으며 굴착방식은 NATM과 싱글셀 공법 모두 발파 굴착으로 하였다. 공사비의 산정은 2000년도 일본 건설성 토목공사 적산기준에 준하였다.

굴착 cycle에 기초하여 연장 500 m 당 굴착 진행, 전체 공기 등의 비교를 수행하였다. 검토결과에 따르면 싱글셀 공법의 경우, 1개월 당 굴착진행은 13 m 정도(NATM 73.8 m, 싱글셀 86.7 m), 굴착공정은 1.0개월(NATM 6.8개월, 싱글셀 5.8개월), 전체공정은 2개월(NATM 13.6개월, 싱글셀 11.6개월) 정도 NATM보다 빠르게 나타났다. 공사비를 비교한 결과 싱글셀 쪽이 NATM에 비해 10%정도 공사비를 절감할 수 있다고 판단되었다. 공사비 산정시 세부적인 사항으로는 터널 굴착비는 싱글셀 공법의 경우, 여굴 채우기 두께가 없으므로 굴착단면적이 축소되어 8%정도 NATM에 비해 절약된다. 또한 싱글셀 공법에서는 방수공과 복공 콘크리트를 계상하고 있지 않으므로 이것만으로도 20%이상의 공사비가 절감된다. 그러나 슛크리트의 경우 두께나 사용재료의 종류가 증가하기 때문에 3배 정도 싱글셀 공법이 비싸게 된다.

터널의 공사비 산정에서는 유지관리 등을 포함하는 장기적인 검토는 하지 않았다. 그러나 싱글셀은 고품질이므로, 내구연한은 NATM에 비해 장기간(100년 정도)일 것으로 판단되며 내구연한에 의한 비용을 고려하면 싱글셀 공법은 NATM 보다 더욱 경제성이 있다.

결론적으로, 지오프론트 연구회(2006)는 싱글셀은 NATM과 비교하여 전체공사비가 약 10%정도 낮아지

며 공기도 단축 할 수 있는 결과를 얻었으나 유럽에서의 싱글셀 실적만큼의 비용 삭감 효과는 얻을 수 없었는데 이것은 고품질 지보재료의 재료비 및 인건비가 유럽보다 비싸기 때문으로 판단하였다.

3. 국내 터널의 암반등급에 따른 경제성 평가

터널 시공비는 건설비에 영향을 주는 요인들이 다양하여 직접 비교가 쉽지 않으며 특히 국내와 다른 나라들 간의 터널 시공비를 비교하는 것은 더욱 어려운 문제이다. 특히 국내의 경우 싱글셀 공법을 적용한 도로 및 철도터널이 없고 암반 등급이 다양하게 나타나므로 기존의 이중셀 공법과 비교한 싱글셀 공법의 절대적인 비용 절감 효과를 산출하는 것은 매우 어렵다. 일반적으로 싱글셀 공법은 암반상태가 양호한 지반에 적합한 공법이므로, 암반상태가 양호한 경우에는 싱글셀 공법의 경제성이 매우 클 것으로 예상되며 암반상태가 불량할수록 싱글셀 공법의 경제성이 저하될 것으로 판단된다. 따라서 암반등급별 외국의 싱글셀 공법과 이중셀 공법의 공사비 및 암반등급별 국내 NATM 터널 공사비를 상호 비교함에 의하여 국내 싱글셀 공법의 경제성을 간접적으로 분석하고자 한다.

김민규(2000)의 국가 간 터널 시공비 비교에 의하면 1996년도 당시 노르웨이의 임금수준은 우리나라보다 2.5배 이상 높았으나 터널 공사비는 오히려 우리나라 보다 약 50%이상 저렴하였다. 김민규(2000)는 노르웨이의 경우 풍화대가 거의 없고 지층구조가 복잡하지 않아서 노두 관찰에서 터널 내부의 지질 상황을 거의 정확하게 예측할 수 있는 장점이 있음을 감안하더라도 노르웨이가 우리나라보다 더 저렴하게 터널을 공사하고 있는 현실로부터 국내 터널의 기술적·제도적 측면에서 좀 더 개선할 여지가 많다고 결론지었다. 노르웨이 터널 공사비가 더 저렴한 가장 큰 이유는 싱글셀 공법을 적극적으로 적용하고 있기 때문으로 판단된다.

국내에서는 호남고속도로 광주시 우회도로 공사구간의 장성터널에서 싱글셀 공법 적용을 계획하였다(이두화 등, 2001). 장성터널 구간은 지형 및 지질조건이 노르웨이와 유사하며 시추조사 결과 터널 시점 및 종점 갱구부 일부 구간을 제외하고 전체 구간 중 90% 이상의 구간에서 절리가 거의 없는 매우 양호한 암반상태(RQD

90이상, 일축압축강도 1300 kg/cm²이상)로 판명되었다. 장성터널에서 싱글셀공법을 적용하는 경우와 NATM을 적용하는 경우의 공기와 개략적인 공사비를 비교한 결과 전체 예상 공기는 약 15개월 단축되고 공사비는 약 20%정도 절감되는 것으로 조사되었다.

국내 싱글셀 터널의 경제성을 간접적으로 분석하기 위해서 국내 NATM 터널의 암반등급에 따른 경제성 평가를 전라북도의 OO 터널을 대상으로 수행하였다. 연구대상 터널의 총 연장은 상행 720 m, 하행 690 m이고 폭 10 m, 단면적 74 m²인 도로터널이다. 터널 주변의 지질은 고기의 편마암류, 편상화강암류 그리고 이들을 관입한 화성암류와 소규모의 용출암류 등으로 대별된다. 터널 중앙부는 RMR이 등급 I인 경암이고 갱구부쪽은 암질이 불량하였다. 터널 구간의 암반등급별 분포 현황은 표 4와 같다.

공사비는 대한건설정보(2006)의 건설공사 표준적산, 암반등급별 표준지보패턴 및 시공사 설계전문가의 자문을 토대로 표 5의 모든 항목들을 고려하여 산정하였으나 지면관계상 암반등급별로 표 6 및 그림 2와 같이 요약하였다. 표 6의 공사비는 설계 공사비로서 실제 공사비와는 차이가 있을 수 있다. 그러나 공사비 산정 목적이 정확한 공사비를 구하는 것이 아니고 암반등급에 따른 공사비 변화의 경향 파악에 있으므로 본 논문의 결과에는 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 그림 2에 의하면, 터널굴착 및 버력처리 비용은 등급 I에서 등급 III까지는 큰 변화를 보이지 않으나 등급 IV부터는 지질조건이 불량하므로 상·하부의 반단면굴착(버력처리)과 제어발파로 인하여 건설비용은 증가한다. 등급 I이 등급 II 보다 터널굴착 및 버력처리 비용이 약간 높은 값을 보이는 이유는 두 등급 모두 같은 화약량으로 발파를 하였으

표 4. 터널 구간의 암반등급별 분포 현황

구 간	암반 등급	I	II	III	IV	V
상행	연장 (m)	86(13.3%)	384(59.5%)	83(12.9%)	42(6.5%)	50(7.8%)
하행		85(13.7%)	360(58.0%)	83(13.4%)	42(6.8%)	50(8.1%)

표 5. 터널 공사비 산정에 사용된 세부 항목

항 목	세부 항목(암반 등급별)	
1. 터널굴착 및 버력처리	터널 굴착	전단면 굴착, 반단면 굴착(상부, 하부)
	버력 처리	전단면 버력처리, 반단면 버력처리(상부, 하부), 슛크리트 버력 처리
2. 지보재	강지보공, 슛크리트공, 록볼트(상부, 측벽), 프리 그라우팅, 강관다단그라우팅, 선진수평보링, 포어폴링(L=1 m)	
3. 라이닝 콘크리트	강재 동바리 및 거푸집, 콘크리트 타설, 철근 가공 및 조립, 라이닝 신축이음, 라이닝 시공이음, 배면 그라우팅, 면정리, 지수판 설치, 방수앵커설치	
4. 방수공	필터 콘크리트, PVC 유공관, 방수막 및 부직포 설치	
5. 배수공	누수지점 유도배수공, 맹암거 유공관, PVC 파이프 설치, 스파이럴 씰덕트, 합판거푸집, 철근가공 및 조립, 콘크리트 타설, 공동구뚜껑, 스틸그레이팅, 비닐깔기	

표 6. 암반 등급별 직접 공사비 내역서(단위 m 당)

(단위: 원)

	TYPE I	TYPE II	TYPE III	TYPE IV	TYPE V
1. 터널굴착 및 버력처리	2,253,630	2,134,620	2,372,180	3,059,110	3,536,900
2. 지보재	2,157,460	2,303,450	2,564,730	3,874,080	4,545,420
3. 라이닝 콘크리트	908,850	908,850	908,850	908,850	908,850
4. 방수공	556,530	556,530	556,530	556,530	556,530
5. 배수공	314,420	314,420	314,420	314,420	314,420
공사비 합계	0	0	0	0	0

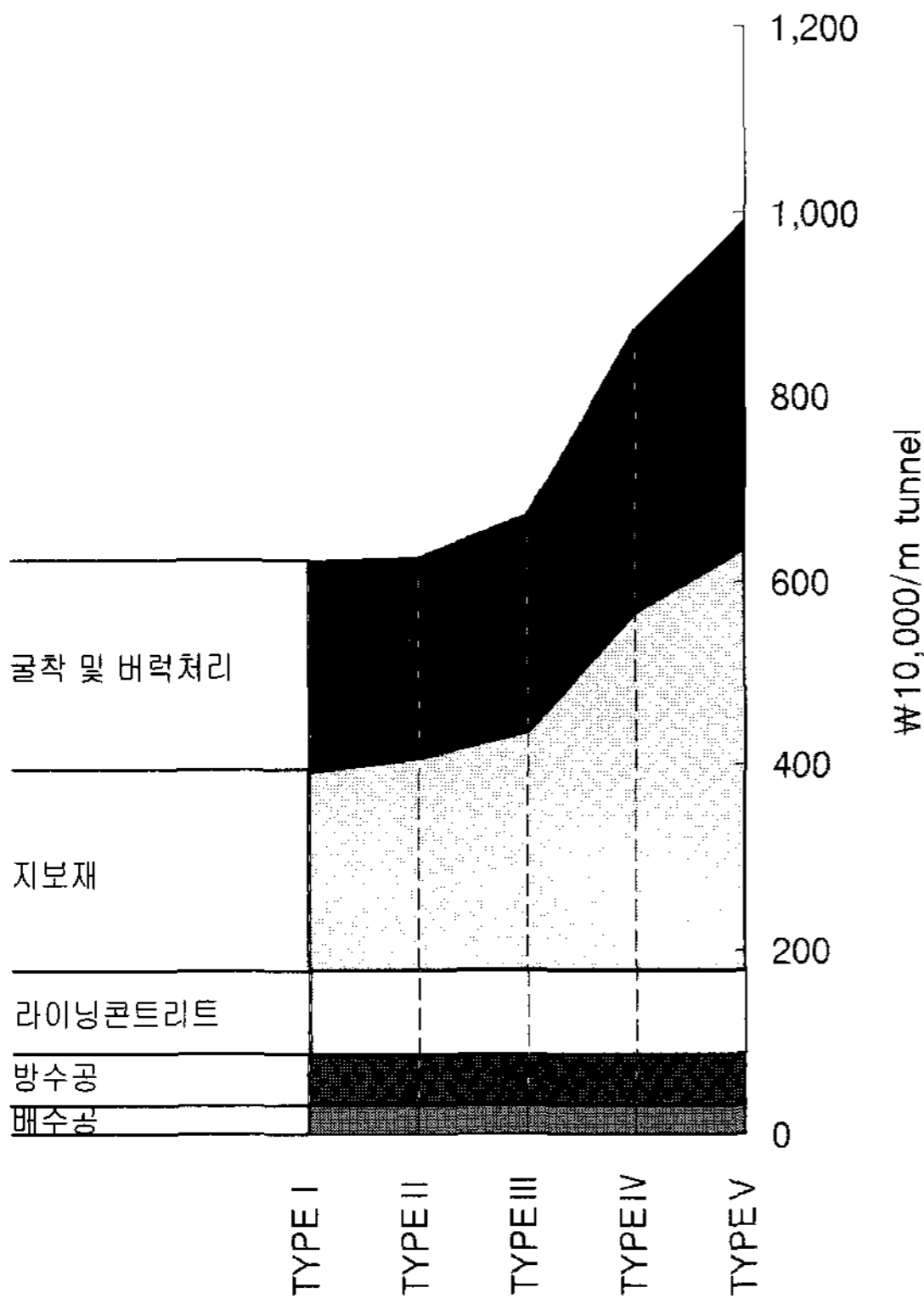


그림 2. OO 터널의 암반등급에 따른 직접 공사비용 분포 현황

로 경암을 천공, 착암하는 경우가 시간과 인력이 더 소요됨에 의한 비용 상승 때문이다. 지보재(강지보공, 슛크리트공, 락볼트공)는 표준지보패턴에서와 같이 등급 I에서 등급 V로 갈수록 지보재의 수량이 늘어나므로 건설비용은 증가한다. 그리고 라이닝콘크리트, 방수공, 배수공은 각 등급별로 같은 단가와 수량으로 시공되므로 건설비용은 같다.

결론적으로 암반상태가 나빠질수록 공사비가 증가하게 되는데 암반 등급 I을 기준으로 단위 m당 공사비 증액은 등급 II(0.4%), 등급 III(8.5%), 등급 IV(40.7%), 등급 V(59.3%)이다. Φ vstedal(1986)은 노르웨이 도로 터널의 암반상태에 따라서 변화하는 터널 시공비를 그림 3과 같이 제시하였다. 국내 OO 터널에서의 공사비 증액은 Φ vstedal(1986)의 노르웨이 터널 연구결과와 증액의 정도는 다르나 유사한 경향을 보이고 있으며, 노르웨이 터널은 암반상태에 따라 터널 공사비가 2배 이상 차이가 남을 보여 주었다. 국내 OO 터널의 총 공사비용

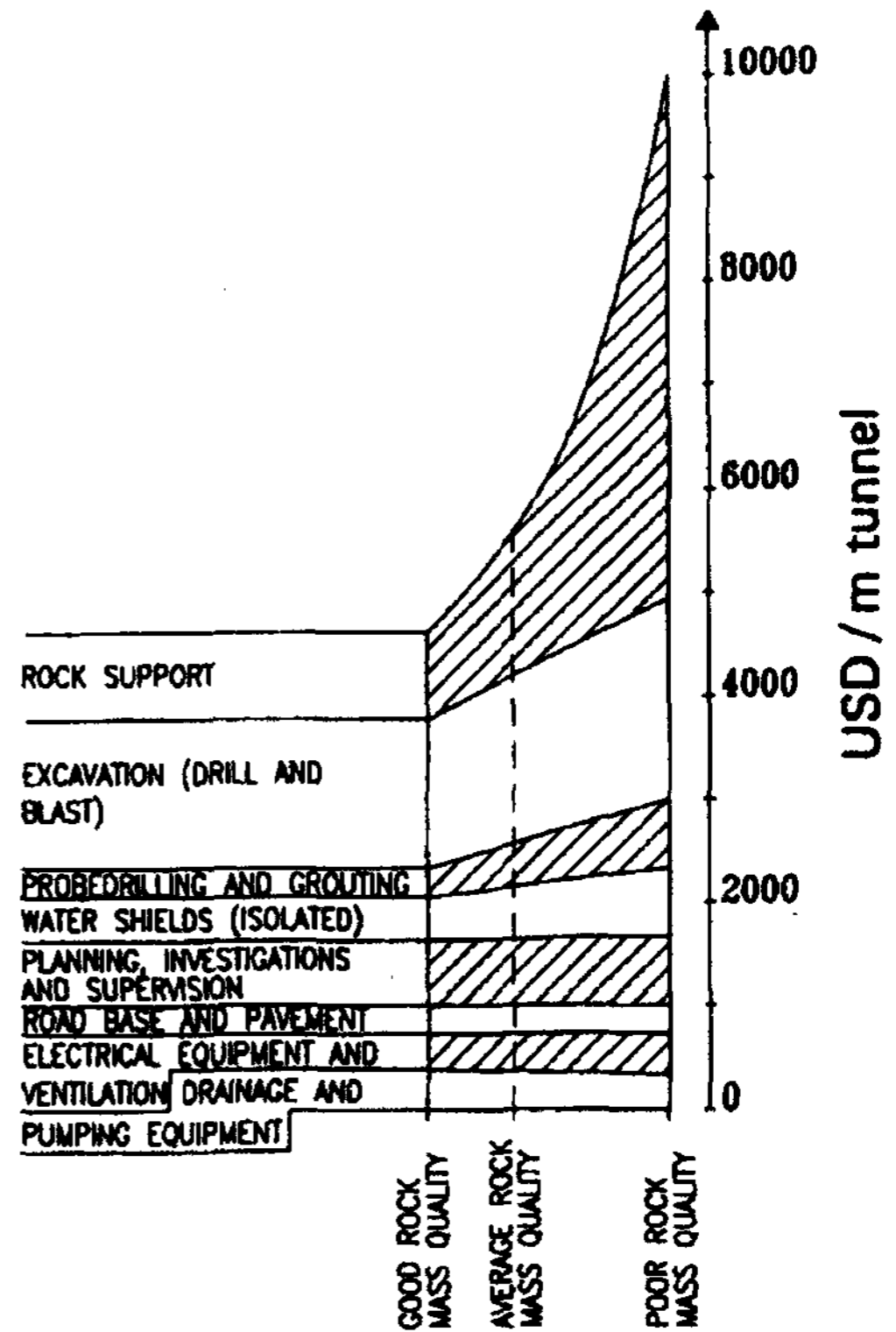


그림 3. 노르웨이 도로터널의 암반상태에 따른 총 공사비용 (Φ vstedal, 1986)

을 그림 3과 비교했을 때 암반상태가 좋을 경우에는 노르웨이 터널이 저렴하지만 암반상태가 불량할수록 공사비가 유사해짐을 알 수 있다.

4. 경제성 평가에 따른 국내 싱글셸 터널 적용 대상 암반

국내외의 사례 조사 결과 싱글셸 터널 공법은 기존의 콘크리트 라이닝을 설치하는 이중셸 터널공법에 비하여 공사비가 저렴한 것을 알 수 있었다. 싱글셸 공법의 공사비가 저렴한 이유는 라이닝 두께가 이중셸보다 얇다는 것과 따라서 터널 굴착량이 줄어든다는 것, 공기 단축 등에 기인한다. 그러나 암반 상태가 불량해 질수록 싱글셸 터널의 경제성은 급격히 저하됨을 보이고 있다. 일본 터널의 사례연구 대상 암반의 경우 Q값은 0.3~1.0이었으며 싱글셸 공법은 NATM과 비교하여 전체공사비가 약 10%정도 절감되었다. 지오프론트 연구회(2006)는

싱글셀 공법의 공사비가 유럽에서의 싱글셀 실적만큼의 비용 삭감 효과는 얻을 수 없었던 것을 고품질 지보재료의 재료비 및 인건비가 유럽보다 비싸기 때문으로 판단하였으나 본 연구 결과에 의하면 암반상태의 영향이 큰 것으로 판단된다. 독일의 경우 싱글셀 터널은 이중셀에 비하여 10-20% 정도의 경비가 절감되는 것으로 추정되었으며 일본의 경우와 마찬가지로 싱글셀 적용 대상 암반의 상태가 불량하여 절감 경비가 상대적으로 크지 않은 것으로 판단된다.

국내의 터널 공사비를 노르웨이와 비교해본 결과 노르웨이의 터널이 국내 터널 건설비용에 비하여 저렴한 것을 알 수 있었다. 이러한 이유로는 국내의 암반상태에 비하여 노르웨이의 암반상태는 풍화대가 거의 없고 지층구조가 복잡하지 않다는 점을 들 수 있다. 또한, 노르웨이에서는 노두 관찰에서 터널 내부의 지질 상황을 거의 정확하게 예측할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 암반상태가 좋은 경우에는 싱글셀 공법을 적용하여 공사비를 줄이는 것이 가능하다. 그러나 그림 2 및 3과 같이 암반상태가 불량해짐에 따라 국내와 노르웨이의 터널 공사비 차이가 현저히 줄어든다는 것을 알 수 있다. 따라서 싱글셀 공법은 암반상태가 양호한 지반에 적용하는 것이 싱글셀 공법의 장점을 극대화 하는 것이다.

국내의 경우, 싱글셀에 대한 시공실적이 거의 없으므로 시행 초기에는 터널의 안정성을 위하여 싱글셀 터널 공법의 적용범위를 제한하는 것이 이상적이다. 즉, 터널 구간의 대부분이 Q시스템의 Jw값이 B등급(Jw=0.66) 이상인 경우인 지하수 유입량이 적고 Q값이 1 이상의 경우인 비교적 양호한 암반조건인 산악 도로 및 철도터널에 한정하는 것이 바람직하다. 지하수 유입량에 제한을 둔 이유는 싱글셀 터널이 일반 터널에 비하여 지하수 처리가 불리하기 때문이다. RMR의 경우에는 터널 구간의 대부분이 I, II 등급인 암반에 적용하는 것이 적절할 것으로 판단되며 지하수 상태는 지하수 처리 비용을 고려하여 결정하여야 한다.

김학준 등(2006)에 의한 국내 11개 터널의 지반상태를 조사한 결과에 의하면 그림 4와 같이 여러 등급의 암반이 함께 나타난다. 각 터널구간별로 Jw와 Q값에 대한 분석 결과, 11개의 터널 현장에서 Jw가 B등급 이상인 구간은 전체연장의 82%, Q 값이 1 이상인 구간은 73%이며 앞의 두 조건을 모두 만족하는 구간은 전체연

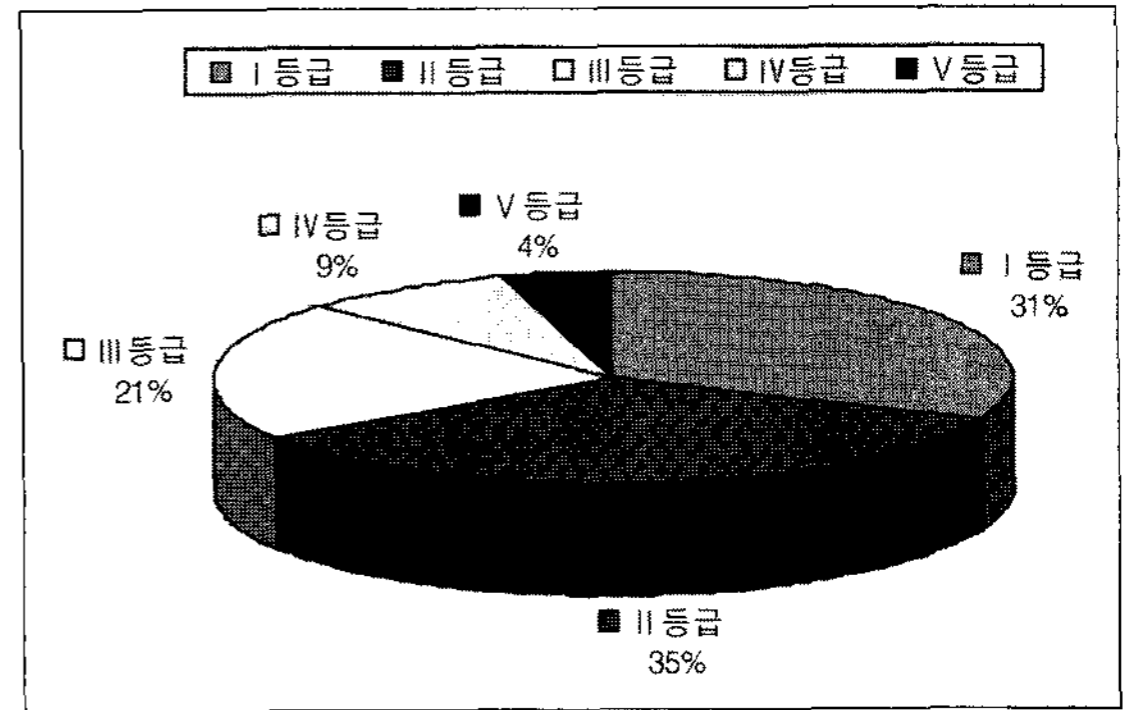


그림 4. 사례지역 터널구간의 암반등급 분포율

장의 63%에 해당된다. 즉, 전체 11개 터널사례 구간 중 63% 구간만이 Jw값이 B등급이상, Q값이 1이상을 동시에 만족한다. 이와 같이 국내의 경우 일반적으로 여러 암반 등급이 다양하게 나타나므로 전체 구간 중 양호한 암반등급과 불량한 암반등급의 비율을 고려하여 싱글셀 공법의 적용 여부를 판단해야 한다. 같은 암반등급이라도 지하수 상태는 양호하고 무결암 강도가 낮은 경우와 지하수 상태는 불량하지만 무결암 강도가 높아서 같은 암반 등급이 될 수 있으며, 이런 경우 NATM 공사비와 싱글셀 공사비 차이는 현저히 다를 수 있으므로 지하수 상태 및 처리 비용에 대한 별도의 평가가 있어야 한다. 또한 공기 단축에 따른 노무비, 장비대여비와 현장관리비 등의 변화를 함께 고려해야 한다.

싱글셀에 이용되는 슛크리트 및 록볼트는 영구지보재로 고려되어야 하며 고품질이어야 하므로 지보재료의 저렴한 공급여부에 따라서 싱글셀 공법의 경제성을 확보할 수 있는 적용대상 터널의 범위가 확대될 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내외의 싱글셀 터널공법과 기존 이중셀 터널공법의 공사비를 비교·검토하여 싱글셀 공법의 국내도입을 위한 경제성을 평가하였다. 본 연구로부터 얻어진 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 노르웨이의 터널 건설비용이 국내보다 저렴한 이유는 국내의 암반상태에 비하여 노르웨이의 암반은 풍

- 확대가 거의 없고 지층구조가 복잡하지 않으며 싱글셀 공법을 적극적으로 적용하기 때문으로 판단된다.
- 일본과 독일 터널의 사례연구 대상 암반의 경우 싱글셀은 NATM과 비교하여 전체공사비가 약 10-20% 정도 절감되는 것으로 추정되었다. 일본과 독일에서의 싱글셀 터널 공사비가 노르웨이와 달리 이중셀에 비하여 절감 효과가 크지 않은 것은 싱글셀 비용 산정에 이용된 대상 암반의 상태가 불량하여 경비 절감이 상대적으로 크지 않은 것으로 판단된다.
 - 국내 OO 터널에서의 사례조사 결과, 국내 이중셀 터널과 노르웨이 싱글셀 터널 공사비는 암반상태가 양호한 경우에는 큰 차이가 발생하지만 암반상태가 불량해짐에 따라 차이가 현저히 줄어들었다. 따라서 싱글셀 공법은 암반상태가 양호한 지반에 적용하는 것이 싱글셀 공법의 경제성을 극대화 하는 것이다.
 - 국내의 경우, 싱글셀에 대한 시공실적이 거의 없으므로 시행 초기에는 Q값이 1이상, Jw 값이 B등급 이상이거나 RMR이 I, II 등급인 비교적 양호한 암반조건의 산악 도로 및 철도터널에 한정하는 것이 바람직하다. 그러나 국내의 경우 일반적으로 여러 암반 등급이 다양하게 나타나므로 전체 구간 중 양호한 암반등급과 불량한 암반등급의 비율을 고려하고 각 터널별로 경제성을 평가하여 싱글셀 공법의 적용 여부를 판단해야 한다.
 - 싱글셀에 이용되는 슛크리트 및 록볼트는 영구지보재로서 고품질이어야 하므로 지보재료의 저렴한 공급여부에 따라서 싱글셀 공법의 경제성을 확보할 수 있는 적용대상 터널의 범위가 확대될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 건설교통부 2006년도 건설핵심연구개발사업인 '한국형 싱글셀 터널공법 개발(과제번호: 03산학연 A01-06)'에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

참고문헌

- 김민규 (2000), "노르웨이의 암석굴착 기술", 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 제10권, pp. 544-552.
- 김학준, 이성호, 신휴성, 배규진 (2006), "국내 암반분류 사례를 통한 싱글셀 터널 지보량 산정 연구", 지질공학, 대한지질공학회, 제16권 제3호, pp. 283-291.
- 대한건설정보(2006), "건설공사 표준적산", p. 1146.
- 박해균, 이명섭, 김재권 (2003), "영구 슛크리트 터널 라이닝 구축을 위한 고성능 슛크리트 개발 (I) -Alkali Free 급결제 적용성 검토", pp. 66-73.
- 배규진, 장수호, 이석원, 박해균, 이명섭, 김재권 (2004), "고성능 슛크리트 라이닝의 설계 및 시공기술 분석", 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제14권 제1호, pp. 1-15.
- 배규진, 장수호, 김동규, 박해균 (2006), "시멘트 모르타르계 록볼트 충전재의 염화물 확산계수 측정을 통한 록볼트 부식 예측", 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제8권 제3호, pp. 259-271.
- 신휴성, 김동규, 장수호, 배규진 (2006), "싱글셀 터널 라이닝의 파괴 메카니즘 및 지보성능에 관한 연구", 터널기술, 한국터널공학회 논문집, pp. 273-287.
- 신희순 (2001), "NMT공법과 조립식 라이닝", 2001년도 한국암반공학회 터널분과위원회 기술세미나 논문집-국내 산악 터널링 기술의 현황과 발전방향, pp. 36-52.
- 이두화, 이성기, 백동호 (2001), "대심도 암반 터널링에서의 NMT 적용 설계 사례", 2001년도 한국암반공학회 터널분과위원회 기술세미나 논문집-국내 산악 터널링 기술의 현황과 발전방향, pp. 1-15.
- 정형식, 배규진, 이상덕 (2001), "경춘선 제 7공구 4개 터널의 PCL공법 적용 타당성에 관한 연구, 연구보고서", 한양대학교 건설연구소.
- 지오프론트 연구회 (2000), "스�크리트 복공에 의한 싱글셀의 설계에 관한 검토보고서", 일본 싱글셀 분과회, 슛크리트 설계위원회.
- 최창림, 김영근, 소충섭, 이두화 (2006), "철도터널 라이닝 두께 최적화 검토", 터널기술, 한국터널공학회 논문집, pp. 60-67.
- 한국건설기술연구원 (2006), "한국형 싱글셀 터널공법 개발", 건설교통부 건설핵심 연구개발 사업 제3차년도 최종보고서, 331p.
- 황학, 정현철, 나승훈 (2001), "무라이닝 터널의 국내 적용", 2001년도 한국암반공학회 터널분과위원회 기술세미나 논문집-국내 산악 터널링 기술의 현황과 발전방향, pp. 16-35.
- Barton, N. (1998), "Norwegian method of tunnelling -The Theory and Practice of NMT", Report for Hyundai Engineering & Construction Co., LTD.
- Barton, N., Grimstad, E., Aas, G., Opsahl, O. A., Bakken, A., Pedersen, L. and Johansen, E. D. (1992), "Norwegian Method of Tunnelling", World Tunnelling and Subsurface Excavation, Mining Journal Limited, Vol. 5, June/August,

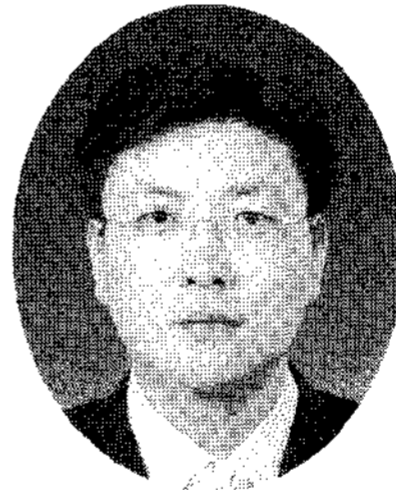
- pp. 324-331.
17. Grimstad, E. and Barton, N. (1993), "Updating of the Q-system for NMT", Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete-Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Fagernes, Norwegian Concrete Association, Oslo, pp. 46-66.
 18. Grimstad, E. and Barton, N. (1995), "Rock mass classification and the use of NMT in India", Proceeding of Conf. on Design and Construction of Underground Structures, New Dehli, India, pp. 63-74.
 19. Haack, A. (1988), "Single-shell in-situ concrete tunnel lining: Experience in the Federal Republic of Germany", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 55-66
 20. Japan Tunnelling Association (1988), "Single-shell in-situ concrete tunnel lining : Experience in Japan", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 51-54
 21. Schreyer, J. (1996), "Constructional and economic solutions for monocoque tunnel lining", Tunnel, Vol. 2, pp. 14-28.
 22. Øvstedal E. (1986), "Standard and costs of Norwegian road and tunnels", In: Norwegian Road Tunnelling, Publ. No. 4, NSREA, Tapir, pp. 19-26.



김 학 준

대전대학교
지반설계정보공학과
부교수

E-mail: hakkim@dju.ac.kr



신 휴 성

한국건설기술연구원
지하구조물연구실
선임연구원

E-mail: hyushin@kict.re.kr
