

국내 지질조건과 유사한 일본의 로드헤더 시공사례 조사 및 암반용 커터 분석



김재영
(주)코템
공학박사/대표이사



박효림
(주)코템
연구전담부서 주임

1. 머리말

최근 국내 도심지 인근 NATM에서 소음·진동의 영향을 최소화하고 연속굴착을 위해 발파공법을 대체하는 대표적인 기계화 굴착공법인 로드헤더의 적용성을 검토하고 적용하는 사례가 조금씩 증가하고 있다. 국내의 경우, 아직까지 로드헤더의 시공실적이 공개되거나 데이터가 축적되어 있지 않아 설계시에는 제조사가 제시하는 이론적 굴착효율에 의존하고 있는 실정이다. 또한, 제조사가 제시하는 시공실적 중에는 국내의 지질조건과 상이하거나 단순히 좋은 효율을 달성한 특정 데이터를 제시하고 있기 때문에 활용시에는 주의가 필요하다. 특히 로드헤더의 굴착능력은 일축압축강도와 슈미트 해머의 반발도 등을 기준으로 예측하고 있으나 실제 굴착능력은 암반상태의 영향에 따라 변화되므로 정밀도 높은 예측은 상당히 어려운 실정이다.

여기서는 국내 지질조건과 유사한 중국, 일본의 로드헤더 시공사례를 문헌조사하여 설계와 시공계획을 수립하는데 있어서 참고적 자료를 제공하고자 한다.

2. 일본의 사례

2.1 굴착능력의 예측식과 실측값의 비교

일본의 경우 일축압축강도 15~80MPa의 안산암이 분포하는 터널공사에서 로드헤더의 굴착능력(Y)에 대해 다음과 같은 예측식을 제안하였고, 표와 같이 1막장에 대해 10개소를 슈미트해머 10회 시험하여 평균하고, 막장관찰기록을 통해 실측값과 비교한 결과를 나타내었다.

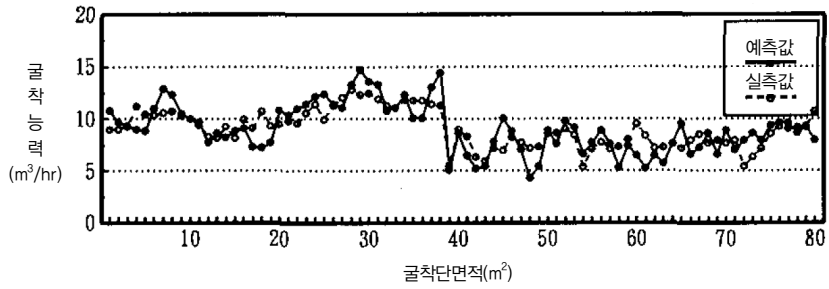
그리고 암반강도와 굴삭효율 및 굴진시간, 싸이클타임과 다운타임에 대한 분석결과를 나타내었다.

$$Y = 23.58 - 0.23X_1 - 0.11X_2 - 0.87X_3 \tag{1}$$

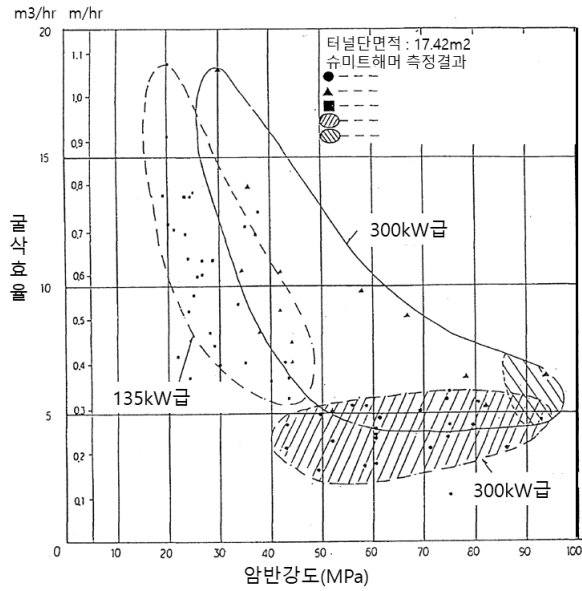
- Y : 로드헤더의 굴착능력(m³/hr)
- X₁ : Cone type 슈미트해머의 반발도
- X₂ : 토피고(m)
- X₃ : 균열의 상태

〈표 1〉 막장관찰기록

A	막장의 상태	1. 안정	2. 막장에서 암괴가 빠져 탈락	3. 막장면의 응기가 발생	4. 막장이 자립하지 않고 붕괴 또는 유출	5. 기타
B	굴착면 상태	1. 자립	2. 시간이 지나면 이완되어 탈락	3. 자립곤란, 굴착후 조기에 지보	4. 굴착보다 선행하여 보강을 할 필요 있음	5. 기타
C	압축강도	1. $\sigma_c \geq 100\text{MPa}$ 해머타격시 반발	2. $100\text{MPa} > \sigma_c \geq 20\text{MPa}$, 해머 타격으로 깨짐	3. $20\text{MPa} > \sigma_c \geq 5\text{MPa}$, 가벼운 타격으로 깨짐	4. $5\text{MPa} > \sigma_c$, 해머선단이 관입됨	5. 기타
D	풍화, 변질	1. 없음	2. 균열부를 따라 변질, 강도가 약간 저하	3. 전제적 변질, 강도가 상당히 저하	4. 토사층, 점토층, 파쇄, 미고결	5. 기타
E	균열의 정도	1. 간격 $d \geq 1\text{m}$	2. $1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$	3. $20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$	4. $5\text{cm} > d$ 파쇄, 미고결	5. 기타
F	균열의 상태	1. 밀착	2. 부분적 개구	3. 개구	4. 점토가 끼어 있거나, 미고결	5. 기타
G	균열의 형태	1. 정방형 	2. 주상 	3. 층상, 판상 	4. 토사, 세립판형, 미고결	5. 기타
H	용수	1. 없음, 누수정도	2. 누수정도	3. 집중 용수	4. 전단면 용수	5. 기타
I	물에 의한 열화	1. 없음	2. 이완 발생	3. 연약화	4. 붕괴, 유출	5. 기타



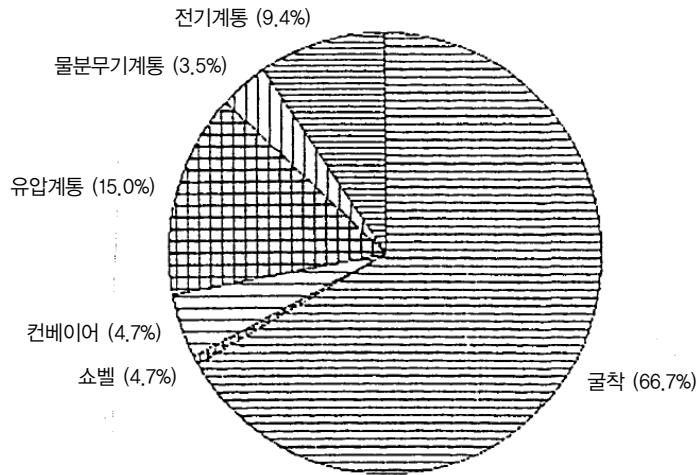
〈그림 1〉 굴착능력의 예측과 실측값의 비교



〈그림 2〉 현장 암반강도별 굴착효율 분석

	0	1	2	3	4	5hr
점검, 피크교체	20'					
파이프, 풍관 등 연장	45'					
굴착		120'		30'		
버력반출		— — — —	— — — —			

〈그림 3〉 암반에서 단면적 17.42m², 굴진장 1.2m의 경우, 로드헤더 사이클(굴착능력 10m³/hr)



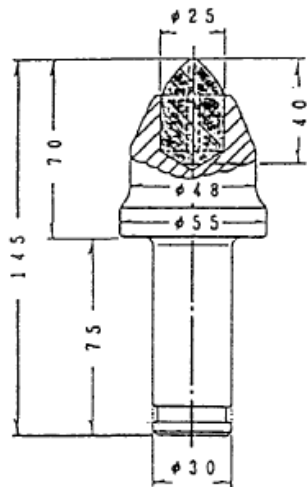
〈그림 4〉 300kW급 로드헤더 부위별 고장율(1990년1월~3월, 총 33건)

〈표 2〉 300kW급 로드헤더 고장실적(1990년 1월~3월, 총 33건)

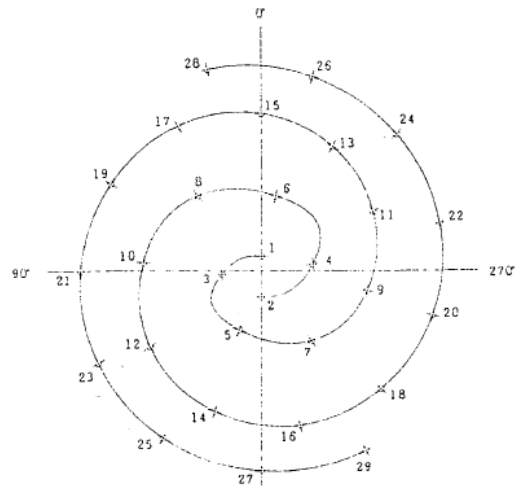
위치		고장 횟수	손실시간(분)	주요 고장내용
굴착부	드럼	2	1,680	마모, 물분무 노즐파손
	실린더	15	2,130	잭의 힘, 부시(Bush) 파손
	밸브, 호스	2	160	파손, 조정불량
쇼벨부		1	40	회전 저하
컨베이어	1차 컨베이어	1	120	아이들러 탈락
	2차 컨베이어	2	160	베어링 파손
유압계통	슬레노이드밸브	1	140	막힘
	유압펌프	3	390	관리불량
	분기밸브	2	360	막힘
물분무 계통		2	210	필터막힘
전기 계통		2	560	케이블, 스위치
합계		33	5,950	

2.2 픽커터에 대한 고려사항

픽커터는 마모에 따른 교체비용, 굴삭효율을 좌우하나 픽커터의 관입깊이, 드럼회전수, 픽커터의 배열 등이 버력의 크기나 분진의 발생에도 큰 영향을 미친다. 현재 픽커터는 일반적으로 초경칩을 사용하고, 그림 5와 같이 직경 25mm의 픽을 표준형으로 사용하고 있다. 굴삭드럼의 픽배열은 그림 5에 나타내는 것과 같이 29개의 픽을 배열하고 있다. 용수에 의한 버력의 슬라임화를 방지하기 위해 픽의 간격을 넓게 하고 버력의 크기를 가능한 크게 함과 동시에 픽의 수량도 최소한으로 하여 분진의 발생량을 낮게 억제하는 것으로 고려한 설계이다.



(a) 표준 픽커터 형상



(b) 굴삭 드럼의 픽커터 배열

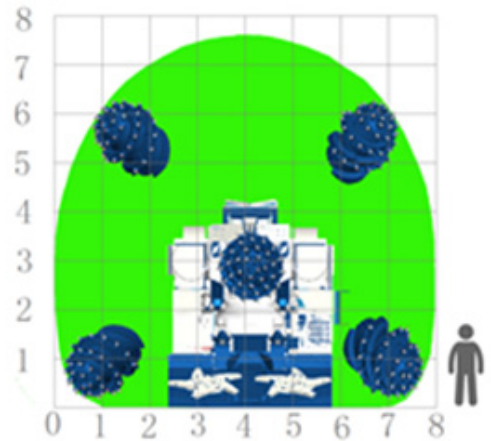
〈그림 5〉 픽커터 형상 및 배열의 예

3. 중국의 로드헤더 선정 가이드라인 및 사례

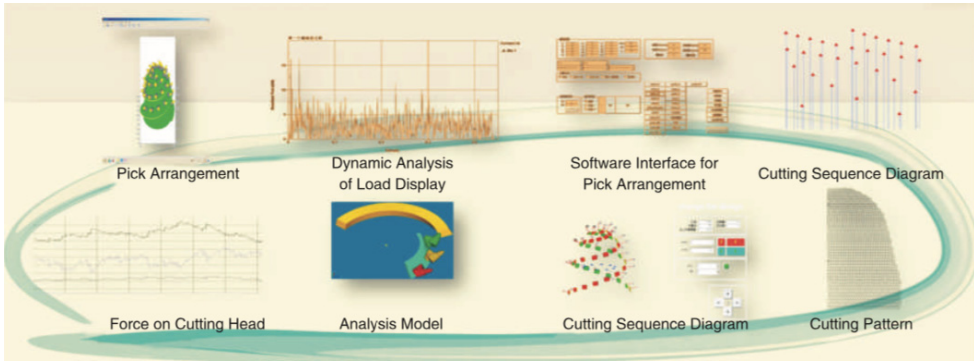
3.1 중국의 로드헤더 선정 가이드라인

중국의 경우 로드헤더의 장비를 선정하는데 있어서는 표 3의 사양을 바탕으로 다음의 사항을 고려하여 적용 모델을 검토하고 있다.

- Technical Advantages
- Large positioning cutting range
- Stronger rock breaking capacity and high cutting efficiency
- High loading efficiency
- High efficiency dust removal system to improve working environment
- Advantages of construction method
- High degree of mechanization
- High security



〈그림 6〉 굴착범위의 설정(Positioning cutting range)



〈그림 7〉 파쇄능력 및 굴삭 효율의 검토

〈표 3〉 대표적인 로드헤더 적용 모델의 사양

Parameter		세계최대 CTR450	CTR323	CTR300A	CTR300R	CTR300D	CTR300S	CTR260T
Total weight (including dust removal and second conveyer)		188t	132.5t	125t	102t	100t	110t	110t
Dimensions	Length	16.2m	16.2/23.5m	15.6/22.4m	17.15m	11.67m	13.4m	17m
	Width	5.01m	4.0m	3.6m	3.8m	3.6m	3.6m	3.6m
	Height	5.1m	4.3m	3.73m	3.82m	3.75m	2.2m	3.8m
Total installed power		772.6kW	633kW	572kW	536kW	488kW	520kW	496.5kW
Recommended rock UCS (up to designed capacity)		80MPa	70MPa	70MPa	50MPa	80MPa	70MPa	70MPa
		200MPa	180MPa	180MPa	160MPa	180MPa	180MPa	180MPa
Cutting range	Width	9.34m	8m	7m	7.4m	7.44m	6.3m	7.2m
	Height	8.26m	7.5m	6.5m	6.7m	6.77m	5.2m	6.4m
Ground pressure		0.19MPa	0.18MPa	0.18MPa	0.15MPa	0.18MPa	0.175MPa	0.19MPa
Grade ability		±14°	±16°	±16°	±16°	±16°	±16°	±16°
Supply voltage		AC1140V	AC1140V	AC1140V	AC1140V	AC1140V	AC1140V	AC1140V
Mini. cooling water		0-136L/min	150/100L/min	150/100L/min	0-90L/min	0-90L/min	150/100L/min	150/60L/min
Transformer capacity to be configured		1000KVA	1000KVA	800KVA	800KVA	630KVA	800KVA	800KVA

〈표 4〉 암반강도와의 관계(Classification by Rock uniaxial compressive strength)

RC, MPa	<20	20-60	60-100	>100
Rock hardness	Soft rock	Slightly soft rock	Hard rock	Very hard rock
Tunneling difficulty	Very easy to tunnel	Easy to tunnel	Difficult to tunnel	Very difficult to tunnel
Loss of pick	low loss	high loss	large loss	great large loss
Applicability of roadheader	Suitable	More suitable	Less suitable	Not suitable
Classification of surrounding rocks	Class-A	Class-B	Class-C	Class-D

〈표 5〉 암반등급에 대한 적용성(Adaptability classification standard for roadheader)

BQ	Grade of surrounding rock	Adaptability classification	Difficulty of drilling	Remarks
<1	VI	Poor adaptability	Extremely easy	
1-5	III	General adaptability	Easy	
5-10	V	Good adaptability	Easy	
10-17	IV	Excellent adaptability	Easy-General	
17-25	V	Good adaptability	General	
25-40	III	General adaptability	General	
>40	II	Flexible adaptability	Difficulty	

〈표 6〉 암반절리등급에 대한 적용성(Classification according to rock fracture development degree)

Rock mass integrity coefficient	>0.5	0.3-0.5	<0.3
Rock mass completeness	Relatively integrated	Relatively broken	Fragmentation
Tunneling difficulty	Very easy to tunnel	Easy to tunnel	Difficult to tunnel
Loss of pick	low loss	high loss	great large loss
Applicability of roadheader	Suitable	More suitable	Not suitable
Classification of surrounding rocks	Class-A	Class-B	Class-C
Basic quality index of rock mass	250-400	<250	>400
Rock mass completeness	Relatively broken	Fragmentation	Relatively integrated
Tunneling speed	Fast tunneling speed	slower	Slow tunneling speed
Applicability of roadheader	Suitable	More suitable	Not suitable
Classification of surrounding rocks	Class-A	Class-B	Class-C

3.2 중국 로드헤더 시공사례

3.2.1 Beijing Shijingshan Maglev Tunnel

- 사용장비 : CTR323
- 터널연장 : 162m
- 터널단면적 : 폭 12.84m, 높이 9.66m
- 암종 : Mainly IV and V surrounding rocks, quartz sandstone layer
- 암반강도 : ~110MPa
- 시공실적
 - 굴착효율 : 18-25m³/hr
 - 굴착량 : 2200m³ (18일간)



<그림 8> Beijing Shijingshan Maglev Tunnel 현장 전경

3.2.2 Chongqing Zengjiayan Bridge and Tunnel

- 사용장비 : CTR323/CTR300A
- 터널연장 : 2006m
- 터널단면적 : 폭 16m, 11m, 12m, 높이 9m (상반 벤치높이 7m)
- 암종 : Mainly III and IV surrounding rocks, sandstone
- 암반강도 : 70~90MPa
- 시공실적
 - 굴착효율 : 16m³/hr
 - 굴착량 : 3500m³ (월평균)



〈그림 9〉 Chongqing Zengjiayan Bridge and Tunnel 현장 전경

3.2.3 Huaguoyuan West Station Inclined Shaft Project in Guiyang

- 사용장비 : CTR323/CTR300A
- 터널연장 : 251m
- 터널단면적 : 폭 7.68m, 높이 7.04m
- 암종 : Mainly III and IV surrounding rocks, weathered dolomite
- 암반강도 : 80~110MPa
- 시공실적
 - 굴착효율 : 7~15m³/hr



〈그림 10〉 Huaguoyuan West Station Inclined Shaft Project 현장 전경

	2019. 10. 1 ^o	<p>Layout plan of the test points on the palm face</p>
Used instrument	Concrete rebound tester	
Point ①	102. 7· Mpa ^o	
Point ②	106. 8· Mpa ^o	
Point ③	98. 7· Mpa ^o	
Point ④	o	
Point ⑤	o	
Point ⑥	83. 4Mpa ^o	
Note:	Mileage: K0+175. 269 ^o	

〈그림 11〉 슈미트해머를 이용한 막장 암반강도 측정의 예

3.2.4 GUIYANG Metro Line No. 3 (터널 횡갱구간, Cross Passage)

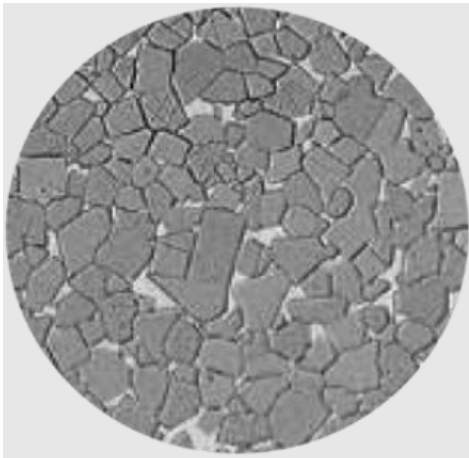
- 사용장비 : CTR300A
- 터널연장 : 437.6m
- 터널단면적 : 51m² (폭 7.68m, 높이 7.04m)
- 암종 : 백운암
- 암반강도 : 70~110MPa
- 시공실적
 - 암반강도 100MPa : 굴착효율 8m³/hr, 일굴진장 1.5m
 - 암반강도 70MPa : 굴착효율 14m³/hr, 일굴진장 3.2m



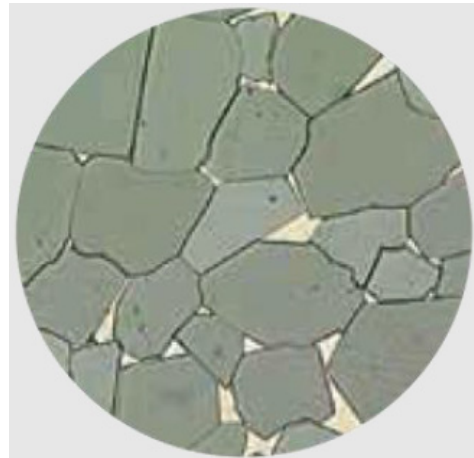
〈그림 12〉 GUIYANG Metro Line No. 3 현장 전경

3.3 커터

그림 13에 중국에서 사용되고 있는 일반적인 초경칩과 암반용에 대해 비교하고 표 7에 암반용 커터의 물성값을 제시하였다. 일반형의 경우 다양한 지층과 풍화암 수준을 대상으로 하고 있으며, 암반용의 경우 강도에 대해 충격이 큰 조건에서 마모를 절감시키기 위해 Cemented Carbide Teeth가 내장된 것을 사용하고 있다.



(a) 일반 초경칩(for Common)



(b) 암반용 초경칩(for Hard Rock)

〈그림 13〉 커터 재료의 비교

〈표 7〉 암반용 커터의 물성값

Material		Impact Toughness	Shear Strength of Welded Joint	Percentage of Weld Jopint
Cutter Body	Carbide Teeth			
42CrMo	Customized	≥ 59J/cm ²	≥ 190MPa	≥ 90%

5. 맺음말

최근 국내에서 소음진동이 없는 기계화 터널공법 중 로드헤더를 사용하는 방법이 검토되고 있으나, 공개된 국내 사례가 없는 실정이다. 이에 국내 지반조건과 유사한 일본, 중국의 로드헤더 사례와 실적데이터를 수집, 분석하였다. 향후 국내 현장에서도 관련 데이터를 수집하고 분석하여, 국내 실정에 맞는 검토방법을 도출하는데 도움이 되기를 기대한다.

참고문헌

1. 코ーン型ブランジャーをもつシュミットハンマーを用いたロードヘッダの掘削能力予測に関する検討 (1994), 일본토목학회 제49회 연차학술강연회, p.170-171.
2. 로드헤ッダによる青函トンネル千軒工区の施工について, 西松建設技報 VOL. 3, p.39-47.
3. CREG, Selection Scheme of CREG Roadheader.
4. 중국의 로드헤더 시공사례 및 최신 기술(2020), 한국암반공학회, 2020 KSRM 기술포럼 로드헤더 기계굴착, p.157-172.

[본 기사는 저자 개인의 의견이며 한국터널지하공간학회의 공식입장과는 무관합니다.]