

국내 Raise Boring Machine의 굴착능력에 관한 연구

이석원¹⁾, 조만섭²⁾, 배규진³⁾

Study on the Workability of Raise Boring Machine in Korea

Seok-Won Lee, Man-Sup Cho and Gyu-Jin Bae

Abstract. In order to investigate the workability of Raise Boring Machine(RBM) such as utilization, penetration rate and advance rate, a vertical shaft of 98 m in length and 3.05 m in diameter was constructed in the layer of conglomerate by using the RBM in this study. In addition, field data from four different construction sites including water-pump power plant tunnel, roadway tunnel and mining tunnel by RBM were collected and analyzed. The results show that the average weekly bored length is 19.3 m and its average utilization is between 54.3 % and 75.1 % very higher than that of the TBM(Tunnel Boring Machine). It also turns out that the bit force increases linearly with respect to the increase of the RPM(revolution per minute) of RBM. However, the net penetration rate decreases with the increase of bit force, RPM of RBM and depth of shaft. The findings of this study can be used to provide the useful information for the design of shaft and the selection of RBM.

KeyWords: RBM, Shaft tunnel, Penetration rate, Utilization, Advance rate

초 록. 본 연구에서는 Raise Boring Machine(RBM)의 가동율, 관입율, 굴진율과 같은 굴착능력을 조사하기 위하여 직경 3.05 m와 총 연장 98 m의 수직구를 RBM을 이용하여 시험시공 하였다. 이와 함께 국내 양수발전소, 도로터널, 석탄광업소 등에서 RBM으로 시공되었던 4개의 수직구 시공현장으로부터 시공자료를 수집하여 분석을 수행하였다. 연구결과, 주간 평균 굴진장은 약 19.3 m로 분석되었고, 평균 가동율은 약 54.3 %에서 75.1 % 사이에 분포하는 것으로 나타나, 이는 TBM 시공실적과 비교하여 볼 때 매우 높은 가동율을 보이고 있다. Bit force와 RPM은 (+)의 직선적인 상관관계로 나타났으며 이는 굴착효율에 따라 작업자의 판단에 기인한 결과로 추정된다. 순관입율과의 관계에서는 RBM작업의 bit force와 RPM 및 수직구 심도가 증가함에 따라 순관입율이 저하되는 (-)의 상관관계를 나타내었다. 본 연구결과는 수직구 설계 및 RBM 장비 선정에 필요한 정보를 줄 수 있을 것으로 사료된다.

핵심어: RBM, 수직구, 관입율, 가동율, 굴진율

1. 서 론

최근에 철도 및 도로의 신설과 선형개선에 따라 장대 터널의 건설이 급증하고 있으며, 유류 및 가스 지하공동 등의 건설에 있어서 공사기간의 단축 및 환기목적으로 수직구의 설계 및 시공이 증가하고 있다. 수직구 건설은 대부분 하향식 Drill and Blast 방식이 널리 사용되어 오다가 1980년에 하부갱도에서 상부로 굴착하는 RBM(raise boring machine)장비가 국내에 처음 도입

되었다. 이 공법은 국내 석탄광업소의 환기갱을 굴착하면서 많은 실적을 보유하고 있고(대한광업진흥공사, 1997), 양수발전소, 도로, 철도터널의 수직구 굴착 등 최근 적용사례가 증가하고 있다(이석원 등, 2000). 그러나, 국내의 RBM 시공과 관련된 자료로서는 시공개소, 굴착연장, 직경 등의 일반적 자료에 국한되어 있고, 설계 및 시공을 위한 기초자료로서 RBM 시공의 기술적 분석이 제시된 바가 없다.

따라서 본 연구에서는 RBM 공법이 적용된 국내 수직구의 시공실적을 조사·분석하였다. 그중 양수발전소, 도로터널 및 광산을 포함하는 대표적인 4개의 RBM 수직구 건설현장에서 시공자료를 수집·분석하여 전체공사기간에 대한 공정별 백분율 및 평균 굴진율 등을 분석함으로써 RBM 굴착방식의 국내 기술력과

¹⁾한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원
²⁾(주)유니백 제1사업본부 터널팀 차장
³⁾한국건설기술연구원 지반연구부 연구부장
접수일: 2003년 3월 17일
심사 완료일: 2003년 5월 13일

시공성을 검토하였다. 또한 RBM 자체의 가동인자들, 즉 bit force(thrust) 와 RPM(revolution per minute)의 변화에 따른 RBM의 굴진 성능을 정량적으로 분석하고자, 강원도 도계읍 S 광업소에서 연장 98 m의 수직구를 RBM으로 굴착하는 현장 시험시공을 수행하였다. 이러한 시험시공 결과와 국내 D 터널에서 수집된 자료를 근거로 하여 RBM 관입율과 RPM, bit force, 굴착심도 등의 상관관계를 분석함으로써, 향후 RBM 설계 시 반드시 필요한 굴진 성능 평가를 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

2. RBM의 시공개요 및 국내 현황

2.1 RBM 굴착방식 개요

RBM 굴착은 하부에 작업공간을 확보할 수 있는 경우에 사용되는 상향식 굴착방법으로, 상부에 RBM장비를 안착시켜 Fig. 1에서 보인 순서와 같이 소구경(\varnothing 311 mm)의 Tri-con Bit로 하향 굴착하면서 유도공을 관통시킨 후 상부로 리머 헤드(reamer head)를 끌어올리면서 회전·압쇄에 의해 대구경(\varnothing 2.4 m~3.05 m)으로 확공하는 방법이다. 경제성을 고려한 굴착 연장은 최소 100 m로서 최대 600 m까지 굴착이 가능하며, 통상 400 m 정도를 시공상 한계로 보고 있지만 현재까지 국외에서는 500 m 이상의 시공 실적도 보고되고 있다(Atlas Copco Robbins, 1997). RBM 굴착은 수직구 내에 인원 투입이 없어 매우 안전하고 작업효율이 높은 장점이 있으며, 용출수가 발생하는 조건에서도 작업이 가능하다. 그러나 극경암 지역에서는 커터의 비용이 높고, 연암이나 풍화암 지역은 측벽의 붕락으로 굴착에 어려움이 있을 수 있다. 또한 유도공이 편향되어 천공될 경우 수평오차를 줄이기 어려운 단점이 있다.

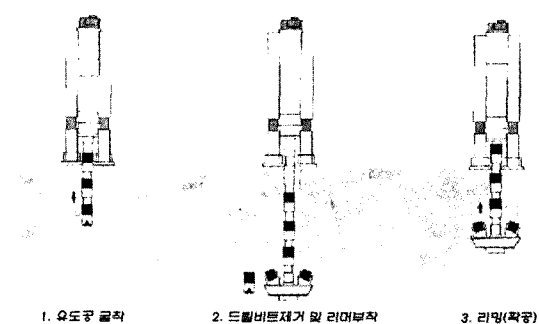


Fig. 1. Schematic diagram of construction of shaft by RBM (Alimak).

2.2 국내 RBM 시공실적

RBM장비는 주로 Robbins Co. Ltd.(1992)에서 제작·판매하며, 현재 국내에서는 (주)경동, 신일지하개발, 대한광업진흥공사 등에서 73RM-DC, 83RM-DC를 보유하고 있다. 국내에서는 약 14개 광업소에서 7,000 m 이상의 환기갱을 RBM으로 굴착하였고, 최근에는 장대 도로 및 철도터널 그리고 양수발전소 수압터널에서 설계 및 시공사례가 증가하는 추세이다. Table 1에는 국내 광업소에서 시공한 RBM 시공실적을 나타내었고, 총 18개 광업소에서 38개의 수직구를 RBM으로 굴착하였다.

수직구에 의한 통기력 분석결과, Table 1에서 보이는 바와 같이 온도강하는 약 3.2 $^{\circ}$ C, 습도저하는 약 4.4 %, 통기량 증가는 약 75.3 %의 개선효과를 확인하였다. RBM시공 시 수평편차의 발생원인으로는 주로 연약대 및 파쇄대 층에서의 굴절에 기인하며, Robbins 사에서 제시하는 수평편차는 적정 굴착심도의 1 % (약 2.83 m) 까지를 허용하고 있다. 국내의 최근 5년간 RBM 시공실적을 분석한 결과, 신형 장비의 도입 및 국내기술력 향상을 통하여 수평편차는 0~0.3 %까지 감소하였다. 참고로 Fig. 2의 본 연구에서 수행한 시험시공에서는 수평편차가 0.2 m 이내의 높은 정밀도로 관통되었다.

RBM을 이용한 수직구 굴착 중 기계 가동상태, bit force, 지질 상황 등에 따라 예상치 않은 여러 가지 사고가 발생할 수 있는데, 국내에서는 RBM장비 도입 초기에 기계 운용방법과 사전 시공준비 미숙 등이 복합적으로 작용하여 발생되었다. 일반적인 사고유형은 리머 헤드의 jamming, stinger 및 stablilizer의 절단, stress modifier 절단에 의한 리머 헤드 추락 등이 있었으며, 암석의 종류 및 강도특성 등에 적합한 RPM과 thrust를 적용하지 못하여 발생되었다. 그러나 신형 83RM-DC 장비의 국내 도입 및 시공기술력 향상으로 인하여 과거 10년간 추락 사고가 발생한 사례는 보고된 바 없다(대한광업진흥공사, 1997).

3. 시험시공 개요 및 지질조건

본 연구의 시험시공은 2001년 8월 1일부터 11월 20일까지(110일간) 수행하였고, 시험시공 현장은 해발 445.0 m의 강원도 삼척시 도계읍 상덕리에 위치한 (주)경동의 S 광업소에서 수행하였다. Fig. 3에는 시험시공 현장의 평면도를 나타내었다. 수직구의 거리는 약 100 m이며, 순 RBM리머 거리는 상부 작업갱과 하부 작업갱의 높이를 제외한 약 90 m이다. 본 시험시공에서 사용된 RBM장비는 스웨덴의 Atlas Copco사에서 제작한

Table 1. Record of performances by RBM in mining.

연도	현장명	직경	심도 (m)	수평편차 (m)	시공효과(주작업장)			암종 및 강도(kg/cm ²)
					온도강하(°C)	습도저하(%)	통기량증가(%)	
1980	봉명 1호	2.4	380		-	-	-	화강암(2,000~2,500)
1981	봉명 2호	2.4	250	0.3	2	6	34	화강암(2,000~2,500)
1982	동원 1호	2.4	230	5.5	1	3	11	조립사암(1,300~1,700)
1982	동원 2호	2.4	220	0.0	1	3	11	조립사암
1983	함태 1호	2.4	290	2.5	2	4	42	세립사암(1,500~2,000)
1983	경동 1호	2.4	300	0.6	2	3	15	반암사암(1,000~1,800)
1984	경동 2호	2.4	230	0.0	2	3	15	반암
1984	함태 2호	2.4	300	1.0	2	4	42	세립사암(1,500~2,000)
1985	한보 1호	2.4	240	0.6	3	3	18	유문암 · 변질사암(1,000~1,800)
1985	동원 3호	2.4	230	0.0	1	3	11	세립사암(1,000~1,800)
1986	대성 1호	2.4	300	0.4	1	2	14	세립사암(2,000~2,500)
1986	은성 1호	2.4	330	0.3	2	2	126	석회석
1987	성주 1호	2.4	225	0.0	1	5	81	조립사암(1,300~1,800)
1987	동양 1호	2.4	270	7.5	7	5	14	돌로마이트(2,000~2,500)
1988	삼탄 1호	2.4	150	0.6	2	2	20	사암(950~1,400)
1989	연화 1호	2.4	380	5.5	10	10	225	석회암 · 스테이트(1,000~1,500)
1990	연화 2호	2.4	380	8.5	10	10	225	석회암 및 스테이트
1990	삼탄 2호	2.4	200	1.2	2	2	120	사암(950~1,400)
1991	강원 1호	2.4	202	0.2	2	3	10	사암 및 세일(800~2,000)
1991	연화 3호	2.4	300	7.0	8	10	200	석회암 · 스테이트(1,000~1,500)
1992	연화 4호	2.4	240	4.8	2	6	-	석회암 및 스테이트
1992	경동 3호	3.05	80		-	-	-	사암(800~2,000)
1993	삼탄 3호	2.4	100		-	-	-	사암(800~2,000)
1993	무극 1호	2.1	270	0.5	3	5	40	사암(1,300~2,200)
1994	무극 2호	2.1	240	0.0	3	5	87	화강암(1,200~1,500)
1994	삼탄 4호	2.4	100		-	-	-	사암(1,000~1,400)
1994	성진 1호	2.4	200	1.0	4	10	100	석회암 및 세일
1995	성진 2호	2.4	215	0.5	3	5	25	세일 및 사암
1995	한보 2호	2.4	150	0.0	3	3	159	세일 및 사암
1995	경동 4호	3.05	200		-	-	-	사암(800~1,500)
1996	성산 1호	2.4	90	0.3	3	2	140	응회암
1996	무극 3호	2.4	240	0.0	3	3	96	화강암
1997	성산 2호	2.4	110		3	3	137	응회암
1997	장성 1호	2.4	115		2	3	85	석회암
1998	대성 1호	2.4	140		4	3	110	석회암
1998	상동 1호	2.4	131		5	4	147	방해석
2000	경동 5호	3.05	348		-	-	-	사암(800~1,500)
2001	경동 6호	3.05	90	0.2	-	-	-	역암(20~700)

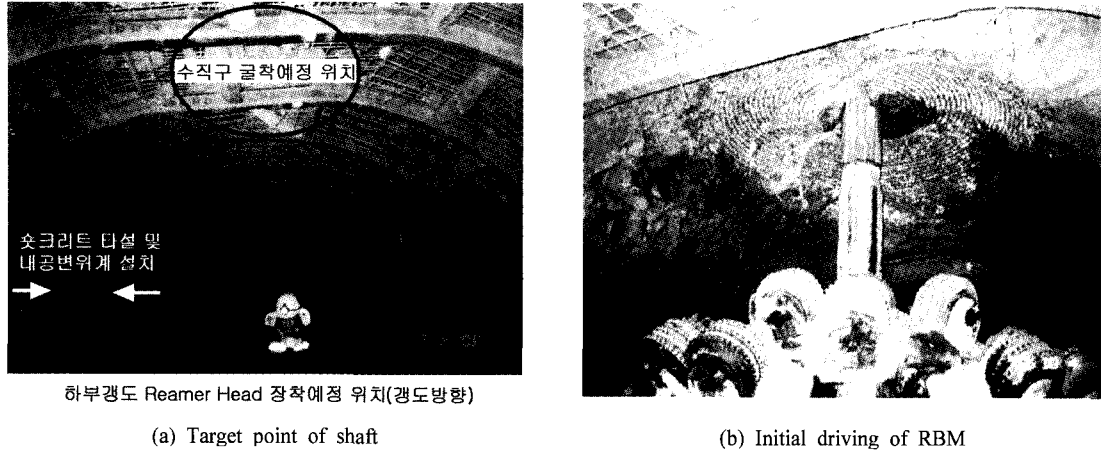


Fig. 2. Pictures of pilot test in this study.

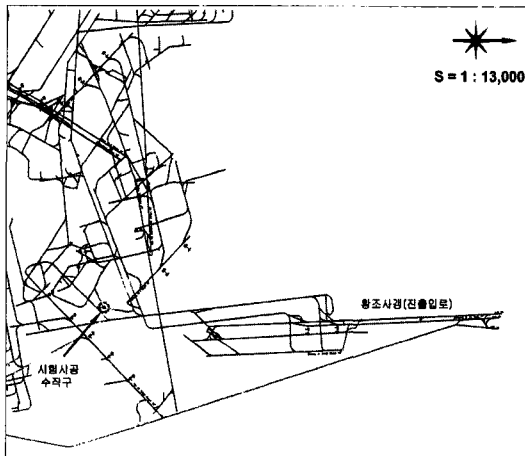
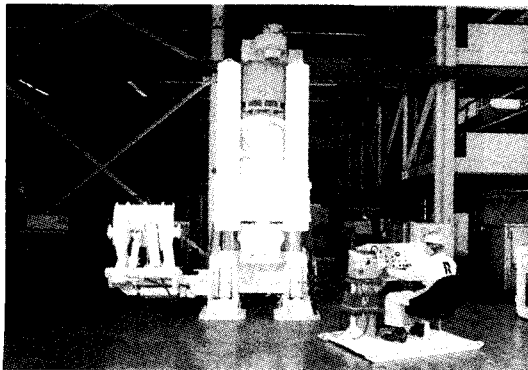


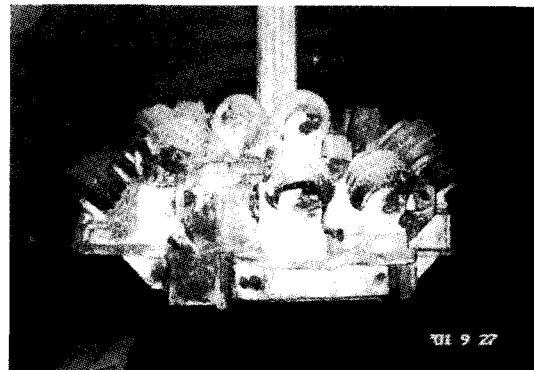
Fig. 3. Plan view of pilot test site.

83RM-DC type이며, 직경 3.05 m의 수직구 단면을 굴착하기 위해서 총 22개의 커터를 장착하였다(Fig. 4 참조).

본 시험시공을 수행한 S 광업소 지역의 지질은 주라 백악기 신라통의 도계동층과 제4기 층적층으로 구성되어 있다. 도계동층은 경상계지층들 중에서 최상위에 속하는 지층으로서 도계동을 중심으로 서남부 일대에 폭 넓게 분포하고 있으며, 본 층은 주로 역암, 사암, 셰일 및 이암 등으로 구성되어 있고 이들은 대체로 응탄질이다. 역암과 사암은 본 층의 하부에서 현저하며, 상부로 갈수록 셰일 및 이암층이 우세하며, 역암의 기질은 알코스질 또는 응탄질로 갈색 내지 담홍색으로 역(礫)의 입도가 높고 크기가 5 cm이내의 것들이다. 본 역암층은 곳에 따라서 알코스 사암으로 전이되며, 도계동 부근에서의 본층 하부에는 역암층이 현저하게 발달해 있다.



(a) RBM(83RM-DC type)



(b) Reamer head

Fig. 4. Raise Boring Machine(RBM).

본 시험시공 현장의 하부 작업갱에서 대표 절리군의 주향과 경사를 조사한 결과 2개의 절리군으로 나타났는데, 하부 작업갱의 축방향(N60E)을 각각 30°, 120°로 교차하여 가로지르고 있다. 이 절리군들의 경사는 작업 갱 진행방향을 중심으로 상부 전방에서 하부 후방으로 누워있는 상태이며, 절리면의 상태는 충전물이 없는 비교적 신선한 것으로 조사되었다.

4. RBM 굴착의 굴진성능 분석

4.1 RBM의 공정별 백분율

RBM 굴착방식의 국내 기술력과 시공성 등에 대한 객관적인 자료를 제시하고자 양수발전소, 도로터널, 석탄광업소 등 국내 4개 현장의 RBM 수직구 시공사례를 수집, 분석하여 전체 공기에 대한 공정별 백분율 및 평균 굴진율 등을 분석하였다. Table 2와 Fig. 5에 나타내었듯이, 시공 연장은 92 m~363 m로 나타났고 연장이 짧은 경우에는 커터 및 파이프 교체에 의한 소요시간이 작게 나타났다. 4개 자료의 유도공 굴착에 소요된 시간은 16.3%~22.1%이며, 확대굴착에서도 35%~55.2%의 범위를 나타내었고, 유도공과 확대굴착에 소요된 시간은 약 54.3%~75.1%로서 비교적 높은 가동율을 나타내었다. 5일을 작업기준으로 한 1주간 굴진율은 시

공 연장에 대해 downtime을 포함한 전체 공사기간으로 나누어 평균 19.3 m/week로 나타났고, 연장이 길어질수록 낮은 굴진율을 보이고 있다.

4.2 시험시공에서의 가동인자 분석

전술한 바와 같이 본 연구에서는 강원도 도계읍 S광업소에서 연장 98 m의 수직구 RBM 굴착 현장 시험시공을 수행하였으며(이석원등, 2002), 본 시험시공 결과와 함께 국내 D 도로터널의 RBM 수직구 시공사례를 토대로 심도별 특성, 장비가동 특성, 가동율 및 관입율 등을 상호 비교하여 보았다.

(1) RBM의 가동율

터널의 기계굴착에 있어서, 가동율은 공사기간 중에 RBM이 실제 굴착에 사용된 시간을 나타내는 것으로 RBM의 굴진율을 결정짓는 중요한 요소이다. 참고로, Table 3에는 국내외의 TBM 굴착사례로부터 구한 가동율을 나타내었고, 일반적으로 약 30~50%의 수준을 보이고 있다(한국건설기술연구원, 1993). 그리고 Table 4에는 국내 TBM 시공사례 중 도로터널 및 수로터널에서의 자료를 토대로 평균 가동율을 나타낸 것으로서 약 30%의 수준이며, 국외사례에 비해 매우 낮은 가동율을 보이고 있다.

Table 2. Analysis of exhausted time by each procedure of RBM boring.

구 분	S양수발전소(조압수조)	S양수발전소(수압터널)	D터널 수직구	S광업소 H3편
RBM 직경	2.4 m	2.4 m	3.05 m	3.05 m
대표암종	화강편마암	화강편마암	화강편마암	사암, 셰일
연 장	92 m	363 m	198 m	357 m

작업공정	작업일 수	%	작업일 수	%	작업일 수	%	작업일 수	%	
작업준비	10	20.4	10	5.7	13	15.1	20	12.0	
유도공	굴 착	8	16.3	35	19.9	19	22.1	32.2	19.3
	기 타	1	2.0	7	4.0	3	3.5	4.8	2.9
리머연결	3	6.1	8	4.5	2	2.3	5	3.0	
확공	확대굴착	21.7	44.3	97.07	55.2	34.24	39.9	58.45	35.0
	커터교체	0	0	9	5.1	6	7.0	24	14.4
	파이프교체	0.42	0.9	1.93	1.0	1.76	2.0	4.55	2.7
	기 타	0.88	1.8	1	0.6	2	2.3	8	4.8
장비철수	4	8.2	7	4.0	5	5.8	10	5.9	
총 계	49	100	176	100	86	100	167	100	
평균 가동율	60.6 %		75.1 %		62.0 %		54.3 %		
주간 굴진율	20.0 m/week		16.65 m/week		22.25 m/week		18.35 m/week		

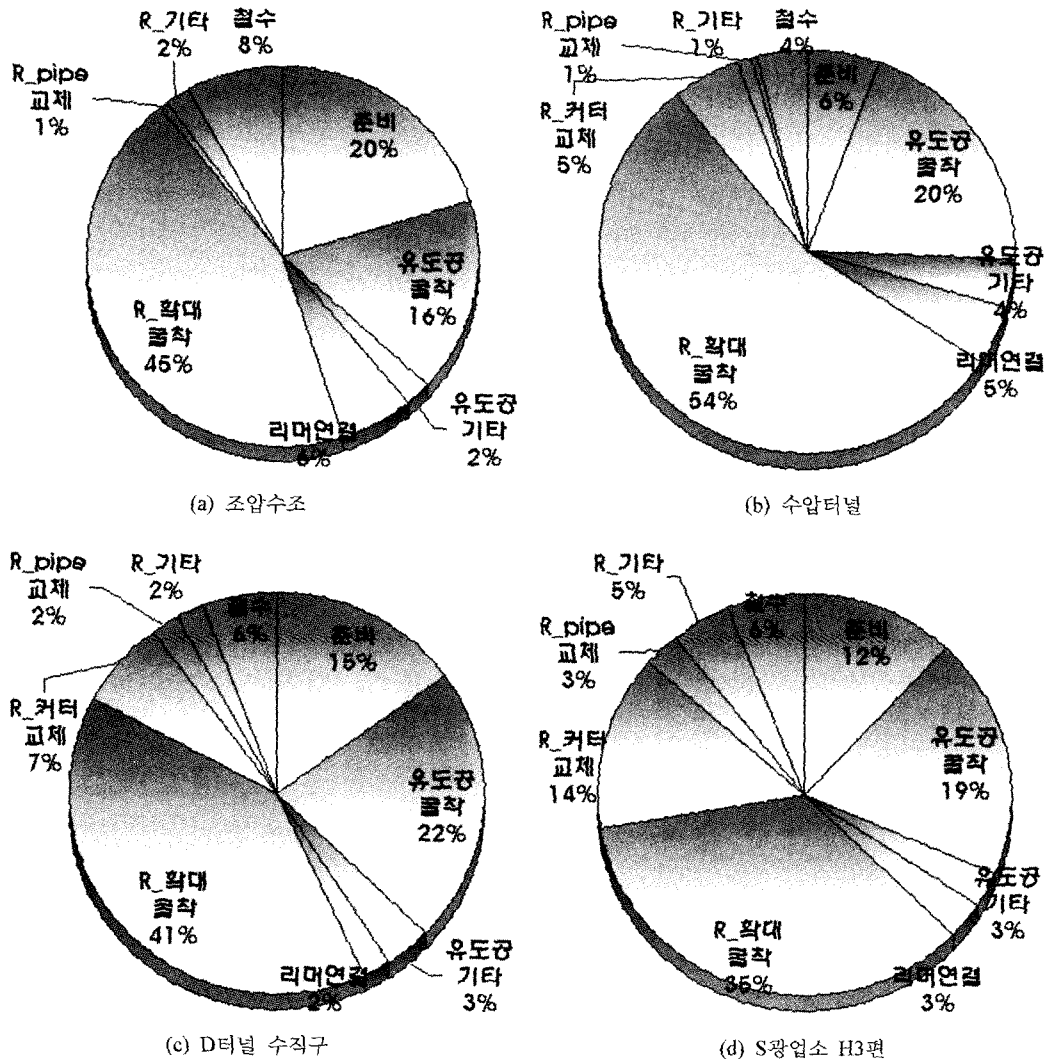


Fig. 5. Percentage of exhausted time by each procedure(R_ : only reaming time).

Table 3. Average utilization of TBM(한국건설기술연구원, 1993).

국의 TBM현장	가동율 (%) ¹⁾	국내 TBM현장	가동율 (%) ²⁾
균질한 석회석	71	안산암	22
혼합된 퇴적암	58	안산암	15
균질한 석회석	56	안산암	30
균질한 석회석	53	편마암	18
균질한 석회석	51	편마암 및 화강암	24
균질한 편암	51	편마암 및 화강암	15
균질한 편암	50	화강암	24
균질한 편암	50		

¹⁾ : Nelson(1983)

²⁾ : 국내 7개소 터널 현장의 균질성능 분석자료

Table 4. Average utilization of TBM in Korea.

구 분	프로젝트 명	TBM 직경	평균 가동율(%)	비 고
도로터널	H.	6.8 m, 8.0 m	33.6, 29.3	1. 총 평균 가동율 : 30.8 % 2. 일반적으로 설계에 채택되는 가동율 : 33.0 %
	J.R.	4.5 m, 5.0 m	27.9, 33.3	
수로터널	JA(A,B,C)	3.5 m	27.4, 37.6, 30.0	
	U.S.	3.5 m	27.1	
	B.A.	5.0 m	31.4	
	K.K.	3.0 m	36.4	
	S.D.	5.0 m	26.7	
	P.H.	3.5 m	34.0	
	Y.D.	3.8 m	26.0	

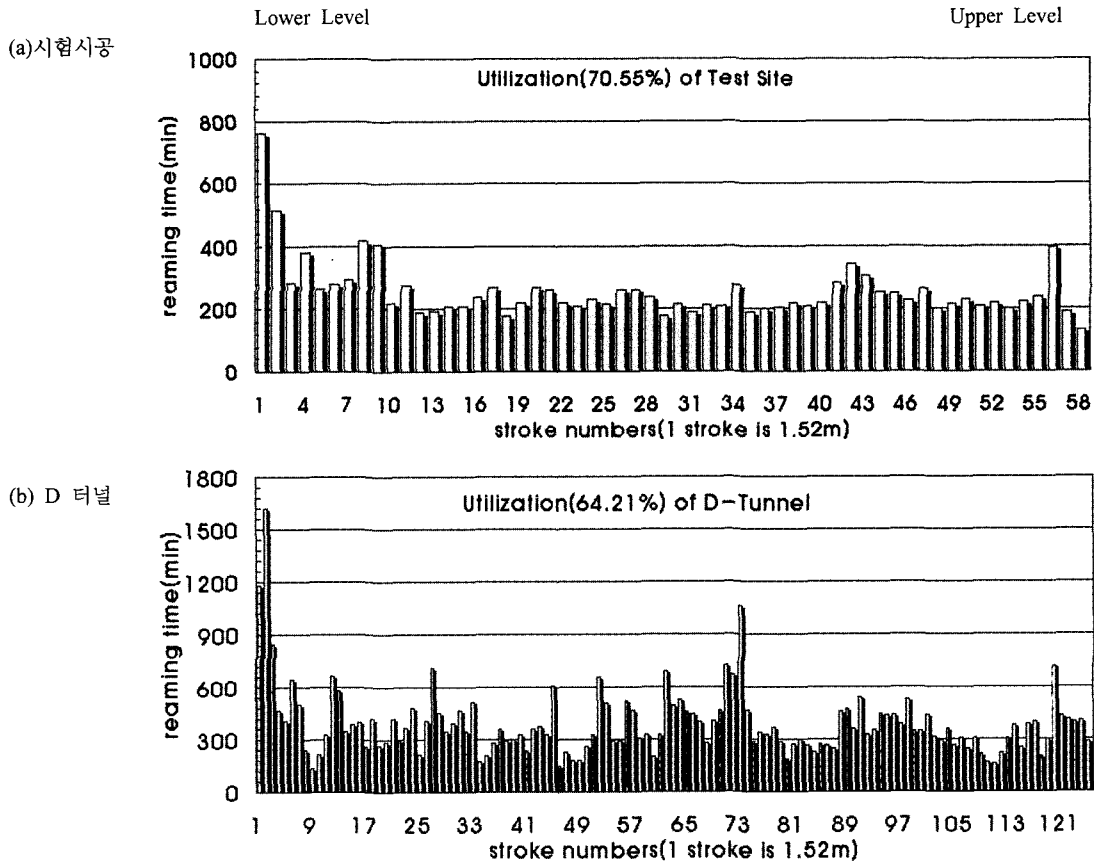


Fig. 6. Reaming time per stroke.

Fig. 6은 본 시험시공과 D 터널 수직구에서 시공한 RBM의 리밍 거리별 가동시간을 나타내었다. Fig. 6에서 stroke란 RBM 굴진시 장비의 특성상 여러개의 stroke를 연결하여 굴진하게 되는데 한 개의 stroke가 1.52 m에 해당한다. 그림에 1 stroke의 굴진시에 소요

된 순 굴삭시간(min)을 표시하였다. 또한 lower level은 RBM의 굴진이 시작되는 하부갱도를 의미하며 upper level이란 수직구 굴착이 종료되는 지표면을 의미한다. (a)의 본 시험시공은 홍점토를 포함하는 역암층에 대하여 약 71 %의 높은 RBM 가동율을 나타내었으며, (b)

의 D 터널은 비교적 경암반에 속하는 화강암으로서 64%의 가동율을 나타내었다. 이와 같이 초기의 작업개시 구간을 제외하고는 비교적 높은 작업효율을 나타내었다.

(2) 순관입율(net penetration rate, Pe)

순관입율은 RBM의 커터헤드가 1회전하였을 때 암반을 뚫고 들어간 관입깊이를 나타내며, 일반적으로 mm/rev으로 표기한다. 순관입율은 1 stroke(1,520 mm) 당 평균 RPM(rev/min)을 작업시간(min)과 곱하여 전체 회전수를 산출하고, 1 stroke인 1,520 mm를 전체 회전수로 나누어 각 stroke 당 순관입율을 산출하였다. 본 시험시공과 D 터널에서의 순관입율을 심도별로 분석하여 Fig. 7 (a) 및 (b)에 각각 나타내었다. (a)의 시험시공 구간은 암석시료의 압축강도 범위가 약 300~600 kg/cm²로서 평균 순관입율은 2.233 mm/rev으로 나타났고, (b)의 경우 대표 암석시료의 압축강도가 약 1,900 kg/cm²

이며 평균 순관입율은 1.488 mm/rev로 나타났다. (a), (b)의 모든 경우에 초기 리밍 시 즉, 심도가 깊은(lower level)지역에 해당하는 수직구 하부에서는 평균 순관입율에 비해 낮은 관입율을 보이지만 굴착이 진행되면서 상부 지표면에 가까울수록 점차 증가 또는 설계속도를 유지하는 일반적인 경향을 보이고 있다. 즉, Fig. 7(a)의 실선 추세선에서 보여주듯이 초기굴착인 약 10 m 내외에서는 “장비가동 이상유무 점검”, “굴착면 자리잡기”, “작업공정 숙련” 등의 부대작업에 기인하여 낮은 굴진속도를 보이고 있으며, 추후 굴착이 진행되면서 굴진속도는 운전자의 작업 기술력 및 지반조건에 따라 가변성을 가지게 된다.

(3) RBM의 가동설계 인자들과 순관입율과의 관계

RBM굴착 시 순관입율에 영향을 미치는 인자들로 암석 강도, 함경도와 같은 지질조건들에 의한 영향과 RBM의 가동에 따른 인자들 즉, bit force(thrust), RPM, torque,

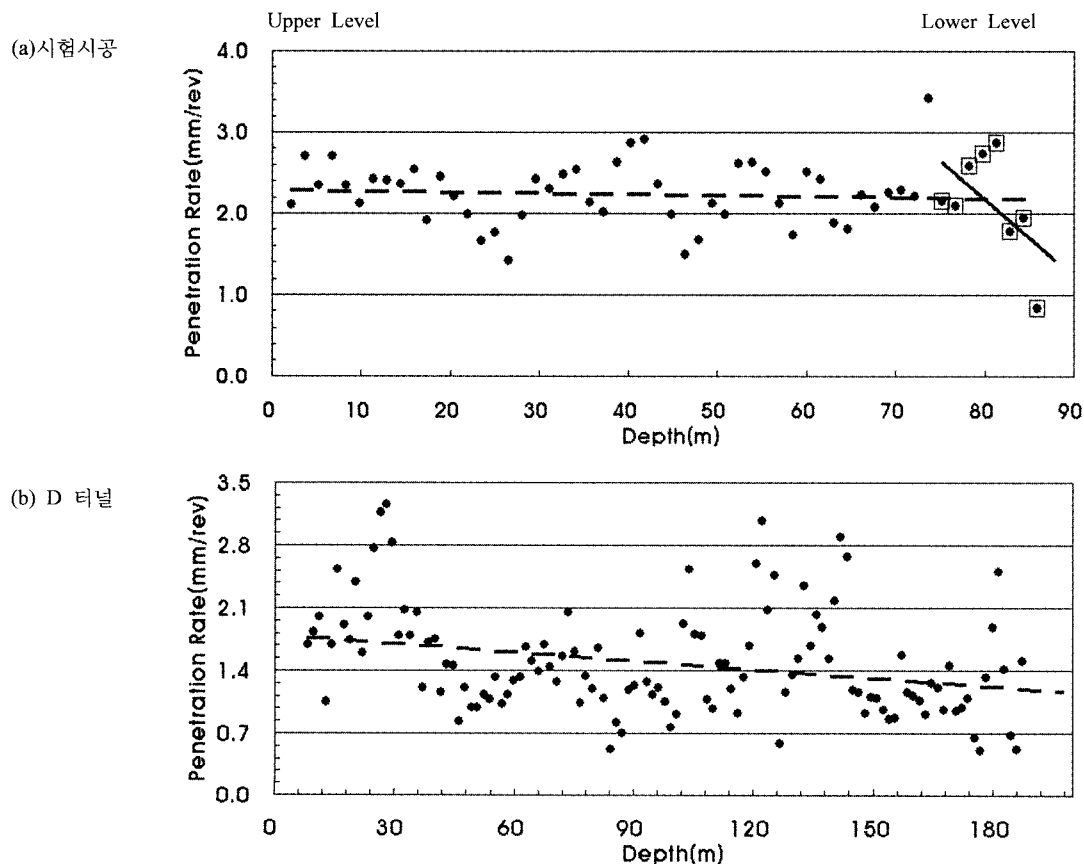


Fig. 7. Net penetration rate by depth.

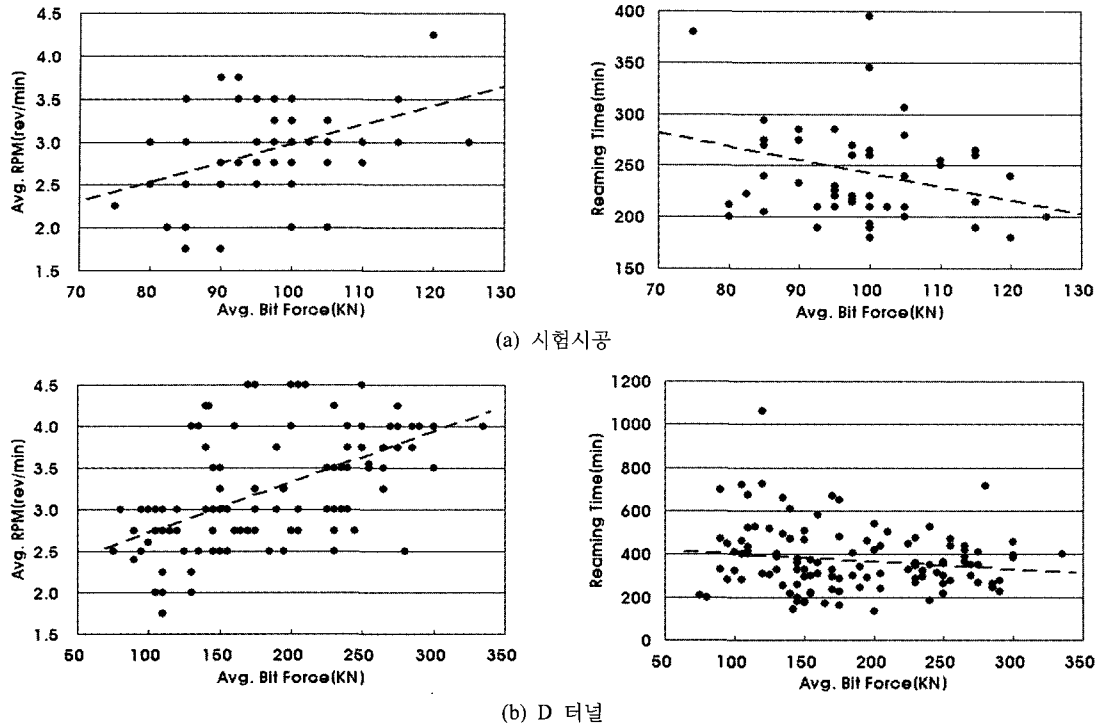


Fig. 8. Relationships between the reaming time, RPM and bit force.

cutter 배열 및 개수 등이 있다. 특히 bit force와 RPM의 조절을 통하여 지질조건에 따른 적절한 굴진성능을 유지할 수 있고, 또한 편심력에 의한 비트의 편마모와 커터헤드 jamming 등의 장비손상을 최소화 할 수 있다.

Fig. 8에는 bit force에 대한 RPM 및 리밍시간과의 관계를 나타내었다. 비교적 낮은 상관성을 보이기는 하나, 그림에서 보는 바와 같이 (a), (b) 모두의 경우에서 bit force(평균)와 RPM(평균)은 (+)의 상관성을 나타내고 있으며, 1일 예상 굴진장, 암질변화 등에 따른 작업 속도의 조절이 요구될 때 두 인자들을 동시에 증가 혹은 감소시키는 것으로 조사되었다. 그리고 bit force(평균)과 1 stroke을 굴착하는데 소요된 순 리밍 시간과의 관계는 낮은 범위의 bit force로 작업을 수행한 경우, 비교적 순 리밍 시간이 많이 소요되었음을 알 수 있었다.

Fig. 8에서 제시한 bit force와 RPM사이의 상관관계를 기초로, 본 시험시공 및 D 터널에 대하여 각각 bit force 및 RPM과 순관입율과의 관계를 상호 비교·검토하여 보았다. Fig. 9 및 Fig. 10에는 1 stroke에 대한 bit force(평균)과 RPM(평균)을 입력형(x-축)으로 하였을 때의 순관입율을 각각 나타내었다. Fig. 9의 (a), (b)에서 비교적 낮은 상관성을 보이고 있지만 bit force가 커질수록 순관입율은 저하되는 경향을 나타내고 있다.

또한 Fig. 10의 경우에도 마찬가지로 비교적 낮은 상관성을 보이고는 있지만 (a), (b)의 모든 경우에서 RPM이 커질수록 순관입율은 저하되는 경향을 나타내었다. Fig. 11에는 U.S. Army Corps.(1997)에서 제시한 TBM에서의 thrust(F_n : bit force와 동일)와 관입율의 관계를 나타내었다. 이 그림으로부터 thrust의 증가에 따른 관입율의 감소 경향은 본 연구 결과와 잘 일치하고 있으나, 암반의 강도증가에 따른 관입율의 감소 경향은 본 연구와 반대의 경향을 보이고 있다. 즉, 본 연구에서는 암반의 강도가 증가할 경우 관입율이 증가하는 경향을 보였으며, 이는 4.2의 (2)에서 언급한 바와 같이 본 시험시공 구간의 암반강도가 약 300~600 kgf/cm²로서 낮은 범위에 속하므로 굴착면의 안정성 및 장비의 보호 등을 고려하여 굴진속도를 저하시켰기 때문으로 사료된다(한국건설기술연구원, 2001).

참고로, Fig. 8에서 Fig. 10은 전술하였듯이 낮은 상관성을 보이고 있으며 그래프에서 제시된 선형 회귀직선은 통계적 의미를 부여하기에는 다소 무리가 있다. 본 논문에서는 분산된 현장 계측 data를 가능한 범위에서 경향을 제시하고 분산정도를 육안으로 판별할 수 있도록 의도하였으며, 이 관계를 실제 현장에 적용하기에는 매우 세심한 검토가 필요하다고 판단된다. 이러한

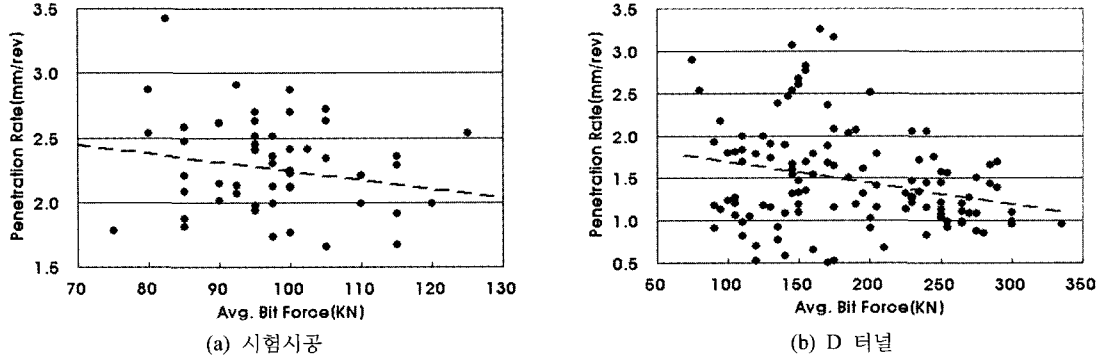


Fig. 9. Relationships between net penetration rate and bit force.

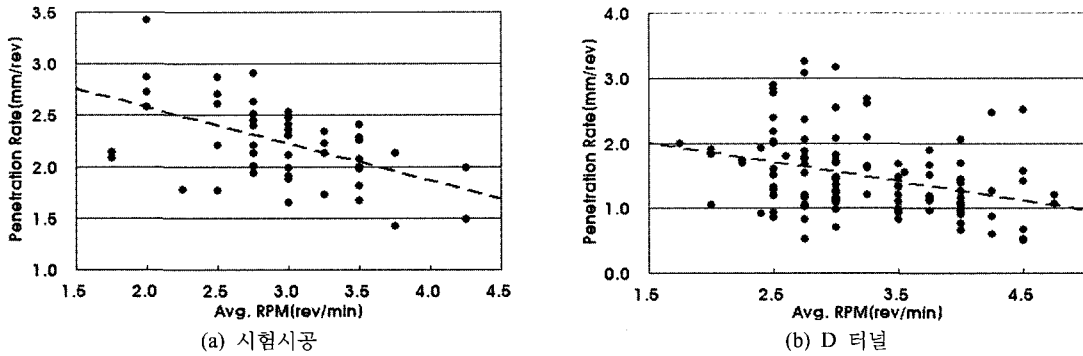


Fig. 10. Relationships between net penetration rate and RPM.

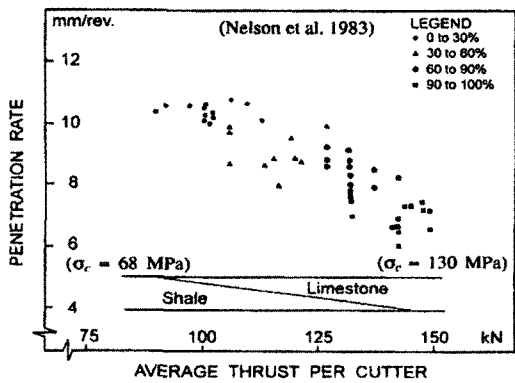


Fig. 11. Relationships between penetration rate and thrust of TBM(U.S. Army Corps, 1997).

분산정도는 U.S. Army Corps.(1997)에서 제시한 Fig. 11에도 나타나 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 RBM 공법이 적용된 국내 수직구의

시공실적을 조사·분석하였다. 그중 양수발전소, 도로 터널 및 광산을 포함하는 대표적인 4개의 RBM 수직구 건설현장에서 시공자료를 수집·분석하여 전체 공사기간에 대한 공정별 백분율 및 평균 굴진율 등을 분석함으로써 RBM 굴착방식의 국내 기술력과 시공성을 검토하였다. 또한 RBM 자체의 가동인자들, 즉 bit force (thrust)와 RPM(revolution per minute)의 변화에 따른 RBM의 굴진 성능을 정량적으로 분석하고자, 강원도 도계읍 S 광업소에서 연장 98 m의 수직구 RBM 굴착 현장 시험시공을 수행하였다. 이러한 시험시공 결과와 국내 D 터널에서 수집된 자료를 근거로 하여 RBM 관입율과 RPM, bit force, 굴착심도 등의 상관관계를 분석하였다. 결국, 이러한 연구를 통하여 추후 수직구 설계 및 RBM 장비 선정에 필요한 정보를 제시해 주고자 본 연구를 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) RBM을 이용한 국내 수직구의 시공은 1980년대 이후 많은 실적을 보유하고 있는데 과거 10년 동안 시공 중 대형사고가 발생된 바 없고, 시공기술의 축적

을 통해 수평편차는 0~0.3 %로 감소하였다.

- 2) 국내 RBM 수직구 시공자료로부터 주간 평균 굴진장은 약 19.3 m/week로 분석되었고, 평균 가동율은 약 54.3 %~75.1 %으로 높은 가동율을 보이고 있다.
- 3) RBM의 시공성에 대한 정량적 분석을 수행한 결과, 굴착 초기의 깊은 심도에서 지표부근으로 굴착이 진행됨에 따라 reaming 소요시간이 감소하는 경향을 보이고 있으며, 따라서 순관입율도 점차 증가하는 경향을 보이고 있다.
- 4) Bit force와 RPM은 (+)의 상관관계로서 굴착효율에 따라 작업자의 판단에 기인한 결과이며, 순관입율과의 관계에서는 bit force와 RPM이 증가될 때 순관입율이 저하되는 (-)의 상관관계를 나타내었다. 이러한 경향은 굴착위치(심도), 암반 연경도, 절리특성, 기계적 특성 등이 복합적으로 작용된 것으로 사료되며, 현 단계의 분석자료는 분산의 정도나 수집된 자료의 한계성 등을 가지고 있다. 따라서, 실제 현장에 직접 적용하기에는 매우 세심한 검토가 필요하다고 판단되며, 이를 보완하기 위하여 추후 시공될 관련 자료들의 세밀한 분석이 필요하다.

참고문헌

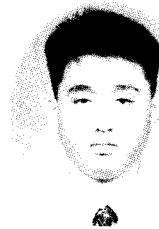
1. 대한광업진흥공사, 1997, 광업진흥공사 30년사: 1967~1997, 413-425.
2. 이석원, 조만섭, 배규진, 2000, 수직구 굴착 공법의 선정 방안, 제 1차 터널 기계화 시공기술 심포지움 논문집, 39-52.
3. 이석원, 조만섭, 서경원, 배규진, 2002, 수직구 상향굴착을 위한 RBM 굴진성능의 분석, 한국지반공학회 2002년도 봄 학술발표회, 157-164.
4. 한국건설기술연구원, 1993, 지하생활공간개발 요소기술 연구-지반굴착기술분야(I), 정책연구보고서, 1-4~1-127.
5. 한국건설기술연구원, 2001, 철도터널 내공단면적 저감을 위한 통풍공(Air-Shaft)의 공기역학 설계기술 및 수직구 굴착공법 개발, '99 산학연 연구개발사업 최종보고서.
6. Alimak, Alimak Raise Climber, Sweden.
7. Atlas Copco Robbins, 1997, Breakthrough, Project and Product News from Atlas Copco Robbins.
8. Nelson, P. P., 1983, Tunnel Boring Machine Performance in Sedimentary Rock, Cornell Univ.
9. The Robbins Company, 1992, The Raise Boring Handbook, Washington, USA.
10. U.S. Army Corps., 1997, Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock, Engineering Manual 1110-2-2901, C-1~C14.

이 석 원



1989년 고려대학교 공과대학 토목공학과
공학사
1991년 고려대학교 대학원 토목공학과
공학석사
1998년 미국 조지아공과대학 토목공학과
공학박사
Tel: 031-910-0230
E-mail: slee@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 지반연구부
선임연구원

조 만 섭



1991년 전북대학교 공과대학
자원공학과 공학사
1993년 전북대학교 공과대학
자원공학과 공학석사
2001년 전북대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 02-3485-3533
E-mail: mscho66@cricmail.net
현재 (주)유니백 제1사업본부 터널팀
차장

배 규 진



1980년 국립경북대학교 농공학과
공학사
1982년 연세대학교 대학원 토목공학과
공학석사
1990년 연세대학교 대학원 토목공학과
공학박사
Tel: 031-910-0162
E-mail: gjbae@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 지반연구부
연구부장