

평사 투영 중첩 기법을 이용한 터널 암반 분류: TMR-net

윤 운상, 임 병렬, 김 정환
서울대학교 지구환경과학부

초 록

경험적 암반 분류법과 운동학적 해석을 동시에 통합하여 사용할 수 있다면, 터널의 암반 상태를 분류하고 예측하는데 매우 유용할 것이다. TMR-net 분석 기법은 RMR 시스템의 평가 기준에 기초한 절리 방향 평가 기준을 설정하고, 이를 극 투영망 상의 평점 기준을 가진 활동 범위로 표현한 평사투영 중첩기법이다. 터널의 설계 및 시공 단계에 적용된 TMR-net 분석은 절리 방향의 영향과 관련된 효과적인 결과를 제공할 수 있었다.

1. 서 론

지하의 지질 정보를 예측하고 이해하는 것은 터널의 설계와 시공 과정에서 중요한 문제 중의 하나이다. 대다수의 터널 프로젝트에서 경험적 암반 분류와 평사 투영법을 이용한 운동학적 해석은 절리, 단층 또는 여타 불연속면 등 지질 구조의 특성과 터널 안정성과의 관계를 설명하는 방법으로서 널리 사용되고 있다. 터널의 활동 파괴 또는 불안정 압괴에 대한 운동학적 해석 결과를 제공하는 평사 투영법을 경험적 암반 분류안과 효과적으로 결합하여 사용할 수 있다면 개별적으로 적용하는 것에 비해 터널의 설계와 시공에 매우 긍정적인 결과를 가져다 줄 것이다. 평사 투영 중첩(stereographic overlay)기법은 불연속면 방향에 대한 평가 기준을 투영망에 중첩하여 불연속면의 방향 도시와 동시에 이에 대한 공학적 평가를 수행할 수 있는 방법으로서 경험적 암반 분류와 운동학적 해석을 통합적으로 운영할 수 있는 효과적으로 방법이다.

윤운상 외(1997)은 Bieniawski(1979)의 RMR 분류법을 기준으로 사면과 터널에 적용할 수 있는 중첩 평사 투영법인 RMR-net를 제안한 바 있다. 이 논문에서는 RMR-net의 터널 적용 형태인 TMR-net의 기본 개념을 소개하고, 국내의 적용 사례를 소개하므로써 TMR-net의 실제 적용성에 대해 논의하고자 한다.

2. TMR-net 의 기본 개념

암반 내 굴착되는 터널에서 불연속면의 방향은 암반 분류 과정에서 직접적으로 또는 간접적으로 반영된다. 터널의 암반 분류와 설계에 널리 활용되는 RMR 시스템(Bieniawski, 1979)은 이러한 터널의 굴착 방향과 불연속면의 방향의 관계에 대해 RMR 값에 대한 보정 요소로서 직접적으로 고려하고

있다. Table 1은 RMR 시스템에서 터널의 굴진 방향에 대한 불연속면 방향의 평가를 위해 제안된 기준이며, 이 외에도 RMR 시스템은 사면과 기초에 대한 평가 기준을 제시하고 있다.

Table 1. adjustment rating for discontinuity orientations of RMR system

Orientations of discontinuities		Very favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	Very unfavorable
Ratings	Tunnels and mines	0	-2	-5	-10	-12
	Foundations	0	-2	-7	-10	-25
	Slopes	0	-6	-25	-50	-60
Orientations of discontinuities		Very favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	Very unfavorable
Rating for Tunnels		0	-2	-5	-10	-12
Strike perpendicular to tunnel axis	Drive with dip	45° -90°	20° -45°			
	Drive against dip			45° -90°	20° -45°	
Strike Parallel to Tunnel axis				20° -45°		45° -90°
Irrespective of Strike				0° -20°		

RMR 시스템의 불연속면 방향에 대한 평가 기준은 일반적으로 터널 축에 평행한 불연속면이 터널에 직각으로 발달한 불연속면보다 불리하다는 것과 터널 굴진 방향에 대해 반대 방향의 경사 방향을 가지는 불연속면이 그 반대에 비해 터널 굴착면의 활동 파괴에 불리하다는 일반적 견해를 도입하고 있다. RMR 시스템에서 불연속면의 방향에 대한 평가는 매우 불리(-12)에서 매우 유리(0)에 이르는 5개 등급으로 평가가 이루어지며, 이렇게 구한 절리 방향 평가 점수는 기본 RMR(Basic RMR) 값에 더하여져 최종적인 RMR(Total RMR) 값을 산정하게 된다. 이와 같은 방법은 터널 안정성에 대한 절리 방향의 영향 평가를 간단하고 효과적으로 수행할 수 있게 한다. 그러나, RMR의 절리 방향 평가 기준이 비교적 모호한 정성적 기술로 구성되어 있고, 그 평가 점수 역시 연속적인 평가 점수의 분포를 예측할 수 없는 단속적인 측면이 존재하여 실제 평가에서 주관적 견해가 관여할 수 밖에 없는 문제를 노정하고 있다.

암반 분류법과 함께 터널의 암반 평가에 효과적으로 적용되고 있는 평사투영해석은 불연속면의 분포 양상을 분석할 수 있는 동시에 절리 방향에 의한 터널의 운동학적 안정성 평가를 비교적 손쉽게 수행할 수 있는 장점이 있다. 반면 터널 굴착 현장에서 바로 그 해석 결과를 제시하기에는 다소 번거로움이 있고, 그 해석 결과를 직접적으로 암반 분류에 사용하기 어려운 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 제시된 방법이 일정한 평가 기준을 투영망상에 중첩하므로써 불연속면의 도시와 동시에 암반 분류에 사용할 수 있는 중첩 평사 투영 기법(overlay stereographic technique)이 제안되고 있다. Francis(1991)는 Fig. 1과 같이 RMR의 불연속면 방향 평가 기준(table 1)을 그대로 투영망상에 중첩시켜 암반 분류와 평사 투영 해석을 결합하는 방법을 제안하였다. 이 투영 해석 방법은 두 평가법을 평가 점수를 매개로 결합시키고 있는 장점을 가지고 있으나, RMR의 절리 방향 평가 기준 자체의 한계를 여전히 유지하고 있으며, 또한 충분히 평사 투영 해석의 효과를 충분히 발휘하고 있지 못하는 점도 사실이다. RMR-net 역시 암반 분류법과 평사투영해석을 통합적으로 사용하기 위한 중첩 평사투영기법으로 제안되었으며, 사면에 적용되는 SMR-net과 터널에 적용되는 TMR-net로 구성되어 있다. 여기서는 TMR-net의 불연속면 방향 평가 기준의 설정과 중첩 투영망의 구성에 대해 간단히 소개하고자 한다. TMR-net는 터널을 사각 단면의 직선 구조물로 가정하고, 두 가지 방법에 의해 터널에 대한 불연속면 방향의 영향을 평가하고 있다. 첫 번째 방법은 터널 각 벽면의 활동 파괴 가능성에

대한 불연속면 방향 평가이며, 두 번째 방법은 3개조 이상의 불연속면이 형성하는 암반 블록의 안정성 문제에 대한 평가이다.

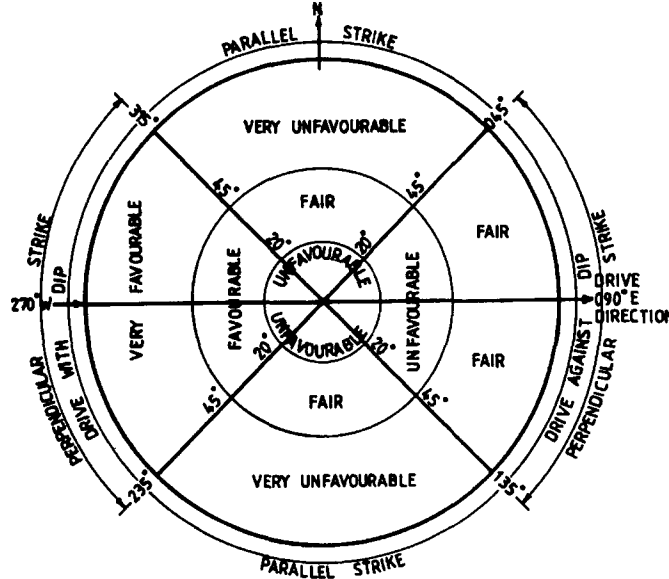


Fig. 1 Stereographic overlay technique of Francis(1991)
Arrow is tunnel driving direction

2.1 터널 벽면의 활동 가능성 평가

터널 각 벽면의 활동 파괴에 대한 평가를 위하여 TMR-net는 양 측벽과 막장면을 수직면으로 가정하였다. Table 2는 이 세 벽면의 활동 파괴 가능성에 대한 절리 방향 평가 기준이다. 이 평가를 위하여 TMR-net에서는 F1과 F2의 평가 요소를 도입하였으며 방향 평가 점수는 이 두 요소의 곱에 의해 결정된다. 이러한 평가 방식은 사면의 암반 분류에 활용되는 SMR 분류(Romana, 1993)의 절리 방향 평가 방법에 기초하고 있다. Bieniawski는 RMR의 불연속면 방향 평가를 사면의 경우 매우 불리(-60)에서 매우 유리(0)의 평점으로 제안한 바 있다.

Table 2. Adjustment rating(F1×F2) for discontinuity orientation of TMR-net

Case		Very favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	Very unfavorable
S	$ (\alpha_j \pm 90) - \alpha_t $	-	-	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$< 10^\circ$
F	$ \alpha_j - \alpha_t $	$< 10^\circ$	$10^\circ - 20^\circ$	-	$160^\circ - 170^\circ$ $190^\circ - 200^\circ$	$170^\circ - 190^\circ$
S, F	F1	0	0.15	0.40	0.85	1.00
S	$\beta_j - \phi$	-	$< -10^\circ$	$-10^\circ - 0^\circ$	$0^\circ - 10^\circ$	$> 10^\circ$
F	$\beta_j - \phi$	-	$< -10^\circ$	$-10^\circ - 0^\circ$	$0^\circ - 30^\circ$	-
S, F	F2	-	-2	-5	-10	-12

S: Side wall sliding, F: Face sliding, α_t : Tunnel driving direction, α_j : joint dip direction
 $\beta_j/\beta_{j1}/\beta_{j2}/\beta_{j3}$: Dip angle of joint and joint sets(j1, j2, j3), ϕ : Friction angle

Romana는 이러한 점수 범위를 연속적으로 표현하는 평점 방식을 제안하고, F1, F2, F3의 3개 요소의 곱에 의한 사면에 대해 불연속면 방향에 대한 평가 점수를 산정할 수 있도록 하였다(Table 3). 이때, F1은 사면과 불연속면의 경사 방향 관계, F2는 불연속면의 경사각, F3는 사면과 불연속면의 경사각 관계를 지시한다.

Table 3. Adjustment rating for discontinuity orientation of SMR (Romana, 1993)

Case		very favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	very unfavorable
P	$ \alpha_j - \alpha_s $	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$
T	$ \alpha_j - \alpha_s - 180 $	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$
P/T	F1	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P	$ \beta_j $	$< 20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$> 45^\circ$
P	F2	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
T	F2	1	1	1	1	1
P	$\beta_j - \beta_s$	$> 10^\circ$	$10^\circ - 0^\circ$	0°	$0^\circ - (-10^\circ)$	$< -10^\circ$
T	$\beta_j + \beta_s$	$< 110^\circ$	$110^\circ - 120^\circ$	$> 120^\circ$		
P/T	F3	0	-6	-25	-50	-60

P=plane failure, T=toppling failure, α_s =slope dip direction, α_j =joint dip direction
 β_s = slope dip, β_j = joint dip

TMR-net의 터널 벽면에 대한 절리 방향 평가 기준(Table 2)은 SMR에서 제시된 평가 기준(Table 3)을 터널 굴진 방향과의 관계로 수정하고, 그 점수 범위 역시 터널에 대한 불연속면 방향 평가의 점수 범위(-12 - 0)으로 변경하여 설정된 것이다. 단, 터널 벽면은 모두 수직면인 것으로 가정하였으므로 F3 요소는 고려하지 않았다. 또한 불연속면의 방향에 대한 평가 시에 불연속면의 전단 강도를 고려하기 위하여 F2를 절리의 경사각과 마찰각의 관계로 정의하였다. Table 2의 TMR-net 평가 기준은 투영망 상의 평점 기준선을 가진 측벽 활동 범위(sidewall sliding envelop)와 막장면 활동 범위(face sliding envelop)로 표시될 수 있다(Fig. 2). TMR-net는 현장 절리 자료의 도시가 간편한 극투영망(polar net) 상에 벽면 활동 범위를 중첩한 형태로서, 터널 굴진 방향선, 활동 범위 기준선, 마찰원으로 구성되어 있으며, 일반적인 평사투영해석의 투영망 형태를 갖추고 있다. Fig. 2는 서쪽에서 동쪽으로(굴진방향: 90°) 굴진되는 터널의 TMR-net의 예이며, 불연속면의 마찰각은 30° 로 가정되었다. 활동 범위내의 각 각의 평점 기준선은 RMR의 불연속면 방향 평가 점수를 반영하고 있으며, 대체로 투영망 상의 10° 간격으로 배치되어 있고, 마찰원 내부는 유리한 불연속면 방향을 지시한다.

야외 또는 터널 내에서 측정된 불연속면의 극점(pole)을 TMR-net에 도시하였을 때, 극점에 인접한 평점 기준선으로부터 RMR 보정을 위한 절리 방향 평가 점수를 획득할 수 있을 뿐 아니라, 활동 파괴가 우려되는 벽면과 우려되는 활동 파괴의 방향을 예측할 수 있다. 불연속면의 극점 또는 극점의 최대 집중점이 활동 범위내에 도시된다면 그 극점 또는 집중점이 도시된 측벽 또는 막장면은 활동 파괴의 위험에 노출되어 있는 것으로 평가된다. 또한 활동 파괴의 방향은 그 극점 또는 집중점에서 TMR-net의 중심을 향하는 방향이 된다.

Fig. 3은 TMR-net를 이용한 터널 암반 평가의 전형적인 예이다. 역시 터널의 굴진 방향 90° , 마찰각 30° 로 가정된 TMR-net로서, Fig 3a와 3b는 벽면의 활동 파괴를 지시한다. Fig. 3a는 터널의 북측 측벽(또는 좌측벽)의 활동 범위내에 불연속면의 극점이 밀집하여 있으므로 이 북측벽(또는 좌측벽)은 활동 파괴의 가능성이 있는 것으로 평가될 수 있다. 이때, RMR 보정 평가 점수는 -12(매우 불

리)이며, 예상되는 활동 파괴의 방향은 북에서 남쪽(180°)방향이다. Fig. 3b는 터널의 막장면 활동 범위에 극점이 밀집해있으므로 막장면의 활동 파괴가 우려되고, 이때의 RMR 보정 평점은 -10(불리)으로 결정된다.

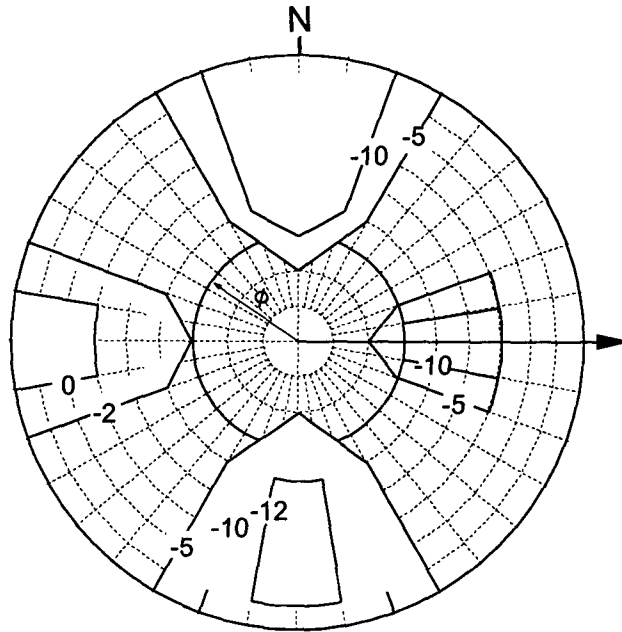


Fig. 2 TMR-net. Tunnel driving direction: arrow, ϕ : friction angle

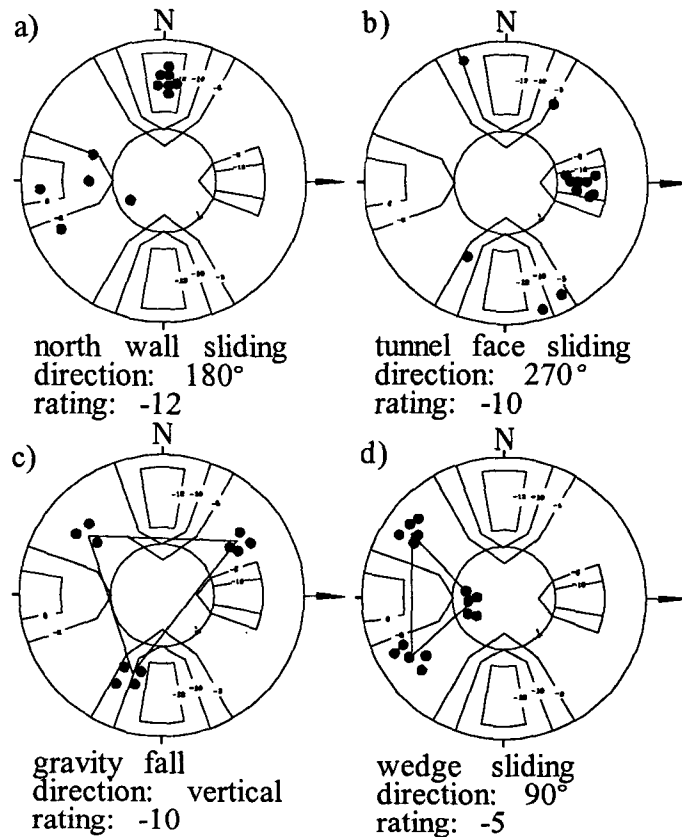


Fig. 3 Wall sliding and block failure analysis using the TMR-net

2.2 터널 천정부의 불안정 압괴 형성 평가

천정부의 낙반(gravity fall) 또는 압괴의 활동 파괴(block sliding)등 암반 블록의 파괴(block failure)는 터널에서 일반적인 파괴 형태 중 하나이다. 하지만 RMR 시스템에서는 이러한 불안정 압괴의 형성과 파괴 가능성에 대한 평가를 수행하는 데 어려움이 있다. 반면 3개 또는 그 이상의 절리군이 조사되었다면, 평사 투영 기법을 이용한 운동학적 해석(kinematic analysis)으로 Fig. 4와 같이 불안정 압괴의 형성과 파괴 가능성을 간단하게 평가할 수 있다(Hoek and Brown, 1980; Farmer and Shelton, 1980). Fig. 4a와 같이 적도 투영망에 대원으로 표시된 3개의 불연속면이 투영망의 중심을 둘러싸고 있다면 이는 천정부 낙반의 가능성을 지시하며, 투영망의 중심을 둘러싸지 않은 상태에서 Fig. 4b와 같은 조건에서는 낙반보다는 압괴의 활동 파괴가 발생할 가능성이 높음을 지시한다.

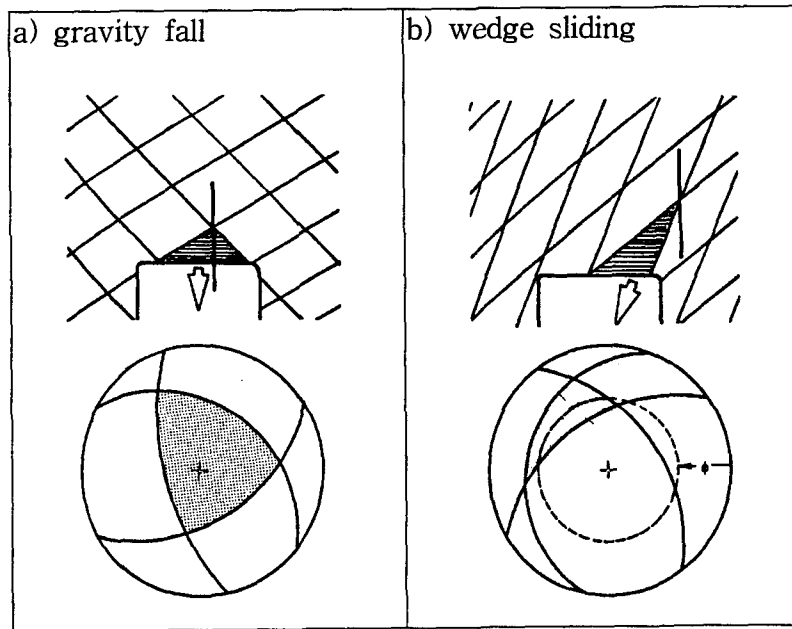


Fig. 4 Stereographic analysis for block failure of tunnel roof (Hoek and Brown,1980)

TMR-net 평가 역시 TMR-net 상의 3개 절리군의 극점을 연결하는 썩기 삼각형(wedge triangle)을 이용하여 신속하게 불안정한 압괴의 형성 조건을 분석할 수 있다. TMR-net에서의 불안정 압괴 평가는 썩기 삼각형의 세 꼭지점의 위치와 투영망의 중심 및 마찰원과의 관계 분석에 의해 수행된다. 불안정 압괴의 낙반이 발생하기 위해서는 Fig. 3c와 같이 썩기 삼각형 내에 투영망의 중심이 포함되어야 한다. 투영망 중심이 썩기 삼각형 외부에 존재하고, 그 썩기 삼각형의 어떤 부분이라도 마찰원의 외부에 존재한다면 낙반보다는 압괴의 활동 파괴가 발생할 것이다(Fig. 3d).

이러한 암반 블록에 대한 TMR-net 평가 기준은 썩기 삼각형과 투영망의 중심과의 위치 관계에 따라 Table 4와 같은 형태로 기술될 수 있다. 암반 블록의 활동 파괴에 관련하여 Pusch(1995)는 마찰원 외부에 놓이는 썩기 삼각형의 면적이 넓어질 수록, 일반적으로 파괴의 위험도는 증가될 수 있다고 언급하였다. TMR-net 평가에서는 이러한 활동 파괴의 위험도를 마찰원과 썩기 삼각형의 세 극점(꼭지점)의 위치 관계에 따라 구분하였다. 즉, 암반 블록 활동 조건에 부합하며, 모든 꼭지점이 마찰원 외부에 있을 때는 암반 블록의 낙반과 함께 상대적으로 불리한 조건으로 평가하고, 세 꼭지점이 모두 마찰원 내부에 있을 경우 매우 유리한 조건으로 평가하였다. 그러나, RMR 평점에 직접적으로 적용되는 보정 점수의 산정은 RMR 평가 기준에 따라 구성된 터널 벽면 활동 가능성 평가 기준(table 2)이 1차

적인 기준이 된다. 따라서 TMR-net에서의 이와 같은 불안정 압괴 형성에 대한 운동학적 분석은 블록 파괴의 유형과 방향을 검토하는 데 주로 사용되어질 수 있으며, table 4의 평점은 터널 벽면 활동 가능성이 터널 굴착에 유리(-2) 또는 매우 유리(0)한 조건으로 평가된 경우에 한하여 사용하는 것이 타당할 것이다. 단, 불안정 압괴의 형성 조건을 암반 분류상의 평점으로 어떻게 반영하는 것이 타당한가의 문제는 보다 많은 연구와 논의가 필요할 것으로 생각된다.

Table 4. Rock block condition of tunnel roof

Block failure condition		Rating	
Wedge fall	Wedge triangle with center point of net	-12	
Wedge sliding	Wedge triangle without center point of net	$\beta_{j1}, \beta_{j2}, \beta_{j3} > \phi$	-10
		$\beta_{j1} < \phi, \beta_{j2} \text{ or } \beta_{j3} > \phi$	-5
		$\beta_{j1}, \beta_{j2}, \beta_{j3} < \phi$	-2

ϕ : Friction angle, $\beta_{j1}/\beta_{j2}/\beta_{j3}$: dip angle of joint sets(j1, j2, j3)

2.3 기타 암반 분류안에 대한 적용

TMR-net은 앞서 언급한 바와 같이 RMR 시스템을 기본 암반 분류법으로 사용한다. 그러나, 그 외의 암반 분류안에도 적절한 방법으로 활용될 수 있다. Q 시스템(Barton et al, 1974)은 RMR과 더불어 가장 널리 사용되는 암반 분류안이지만, 불연속면의 방향을 직접적인 고려대상으로 설정하지 않고 있기 때문에 TMR-net를 Q 시스템에 RMR과 같은 직저접인 방법으로 적용하기는 어렵다. 따라서 Q 시스템을 기본 암반 분류안으로 가지는 터널 또는 지하공간의 설계 또는 시공에서는 필요할 경우 Q 시스템과 RMR 평점과의 상호 대비를 통해 Q 값 산정에 반영하거나, TMR-net 평가 결과를 개별적으로 터널 보강 설계에 반영할 수 있을 것이다. 이 외에 암반 분류체계로서 국내에서 본격적으로 활용된 예는 적지만 Palmström(1996)에 의해 제안된 RMi(Rock Mass index)시스템에 대해서는 RMR에서와 같이 직접적으로 적용 가능하다. RMi 시스템의 암반 평가는 지반의 연속성 지수(CP)에 의해 불연속체 지반과 연속체 지반으로 구분하여 암반을 평가하며, 암반 평가는 절리 특성(JP)과 암석 강도 특성(σ_c)으로 대별되는 두 개의 독립된 암반 특성의 관계로서 수행되며, 아래 식으로 표현된다.

$$RMi = \sigma_c \cdot JP$$

특히 불연속면의 방향이 중요하게 작용하는 불연속체 지반의 지보 체계는 RMi 값에 근거한 지반 상태 요소(ground condition factor, Gc)와 크기 비율(size ratio, Sr)에 의해 결정된다. 크기 비율 Sr은 아래 식과 같으며, 이를 결정하는 요소 중의 하나가 절리의 방향 요소(Co)이다.

$$Sr = (Dt/Db)(Co/Nj)$$

- Dt: 터널 지름(폭 또는 높이)
- Db: 암괴의 최소 지름
- Co: 절리 방향 요소
- Nj: 절리군 수 요소

이 때 절리 방향 요소 Co 는 RMI에서 제안한 table 5에 의하여 구하며, 이 기준은 기본적으로 RMR의 절리 방향 평가를 따르므로 RMI의 절리 방향 요소 평가에 활용할 수 있는 TMR-net는 Fig. 5와 같이 구성할 수 있다.

Table 5. Adjustment rating for discontinuity orientation of RMI (Palmström,1996)

In Wall		In Roof	Term	Rating of
for strike >30°	for strike <30°	for all strike		orientation factor(Co)
dip<20°	dip<20°	dip>45°	favorable	1
dip=20° -40°	dip=20° -45°	dip20° -45°	fair	1.5
dip>45°	-	dip<20°	unfavourable	2
-	dip>45°	-	very unfavorable	3

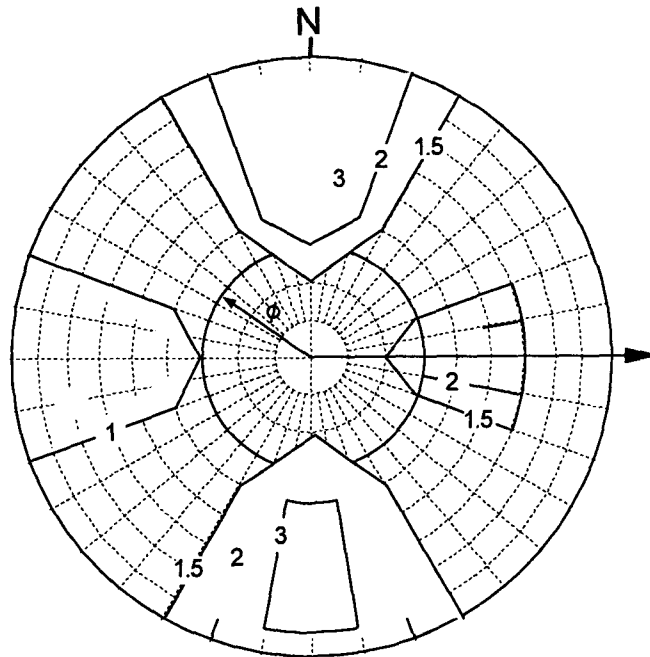


Fig. 5 TMR-net for RMI system

3. TMR-net의 적용 사례

앞에서 언급한 바와 같이 TMR-net는 불연속면의 방향에 대한 운동학적 안정성 평가 이외에도 터널 암반 분류를 위한 절리 방향의 평점을 직접적으로 제공하는 중첩 투영망으로서 RMR을 기본 암반 분류안으로 채택하였을 때의 적용 과정은 다음 Fig. 6과 같다. 이 과정에 의하면 터널 암반 분류 과정에서 기본 RMR 값이 결정된 후, TMR-net 상에 조사된 불연속면의 방향을 도시하여, 그 불연속면 발달 상태 분석에 의해 보정값을 도출하므로써 최종적인 RMR 값을 결정할 수 있으며, 동시에 불안정

안반 블록에 대한 운동학적 해석을 수행하는 등 터널의 파괴 유형 및 방향 등 그 특성을 평가할 수 있다.

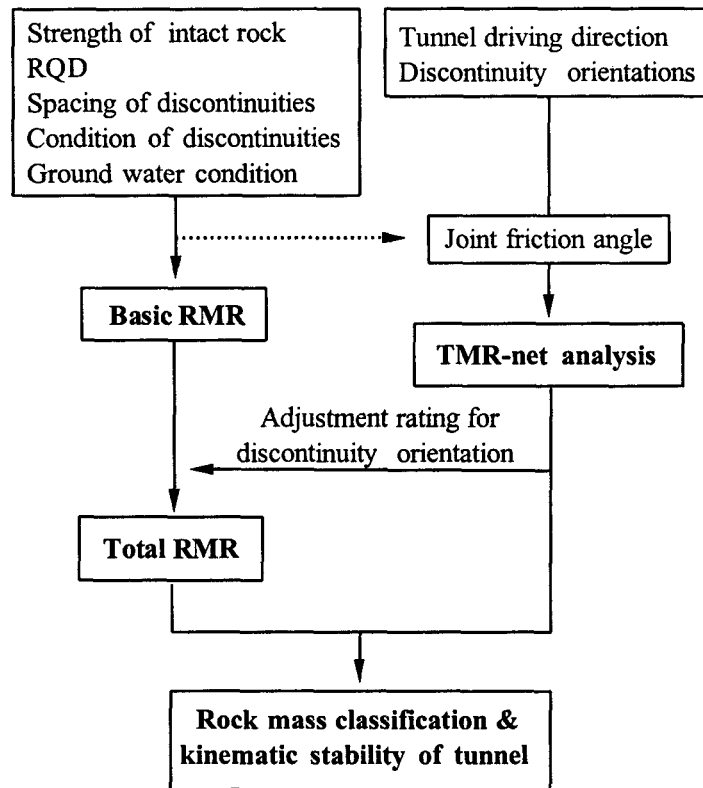


Fig. 6 Process of the TMR-net method for rock mass classification

여기서는 국내의 두 개 사례를 가지고, 이러한 TMR-net 기법의 적용 과정을 소개하고, 이 기법의 적용성 등을 검토하고자 한다. 두 개 사례는 서로 다른 단계 즉, 설계 단계와 시공 단계로 구분되어 선정되었으며, 그 지질 조건 역시 상이하다(Fig. 7). 첫 번째 사례(Site 1)는 선캠브리아기 변성암체 내에 계획된 터널의 설계 단계에서의 TMR-net 적용 사례이며, 두 번째 사례(Site 2)는 중생대 화강암체 내의 터널 굴착 중 적용된 사례이다.

3.1 터널 설계 단계에서의 적용: Site 1

이 TMR-net 적용은 4km 이상의 길이를 가진 철도 터널의 부지 조사 및 설계 단계에서 수행된 것이다. Fig. 8은 터널이 계획된 부지(Site 1) 주변의 지질도와 터널 계획 노선에 대한 지질 종단면도이다. 이 터널 부지는 대부분 선캠브리아기의 변성암류로 구성되어 있으며, 이외 시대 미상의 화강암, 백악기 퇴적암류가 분포하고 있다. 이 지역의 선캠브리아기의 변성암체는 크게 편마암, 편암, 규암 등 세가지 암석 종류로 구분된다.

이들 변성암체 내에는 남북 방향의 횡와 습곡(overtured fold)가 발달하고 있다. 야외 노두에서 이들 습곡 구조는 남북 또는 북북동의 주향을 가지며, 동경사하는 습곡 측면을 가지는 좁은 익간각의 습곡 형태를 보인다. 이 습곡측면의 방향은 지역의 광역적 엽리 구조와 일반적으로 평행하게 발달하며, 지질도 상에서 표시되는 습곡 구조의 축선과 대체로 일치하고 있다.

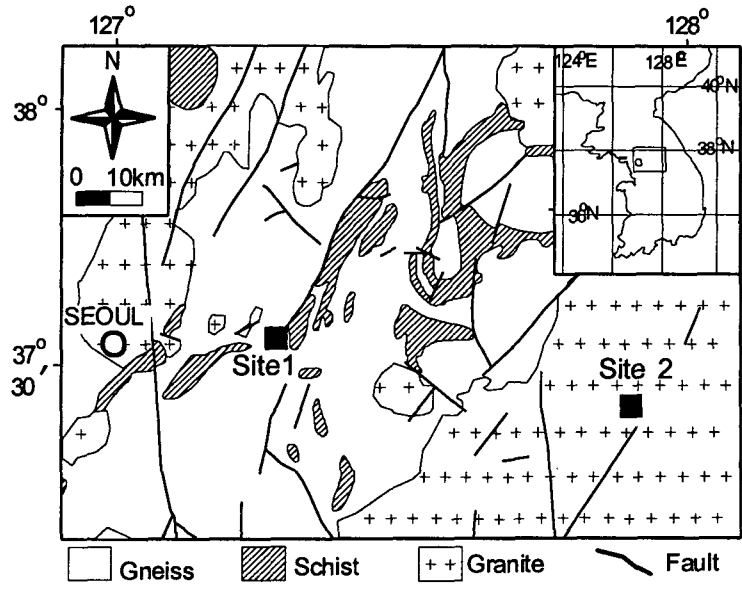


Fig. 7. Locality map of TMR-net application sites

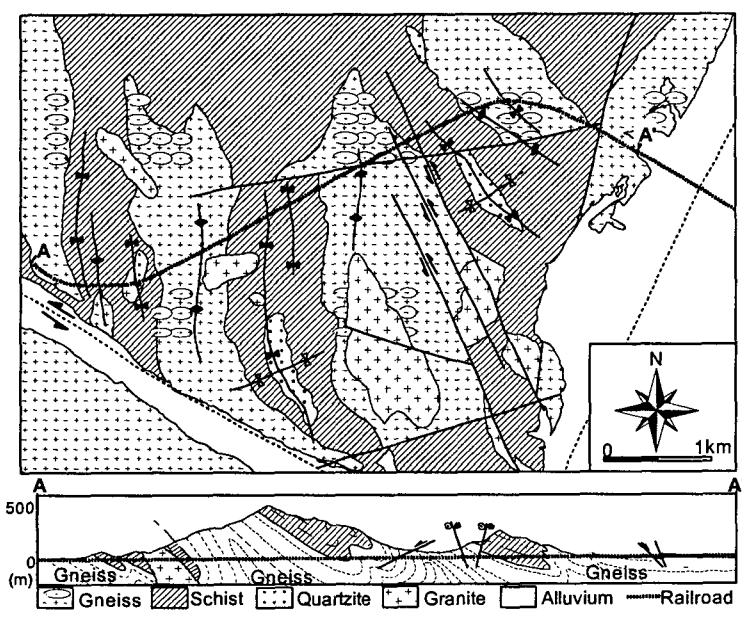


Fig. 8 Geological map and section of tunnel in the Site 1

이 지역에서 상기한 습곡 구조는 터널 축 상에서 수 개의 향사부(syncline)와 배사부(anticline)를 반복한다. 특히 배사부의 경우 대부분 지형적으로 저지대를 형성하고 있는 편마암 지역에 발달하고 있으며, 반면 향사부는 지형성적으로 고지대의 편암 및 규암 지역에 발달한다. 이 남북 방향의 습곡들은 다시 후기의 동서 또는 동북동 방향의 완만한 습곡에 의해 재습곡되고 있으며, 또한 고각의 단층에 의해 절단되어 있다. 이들 고각의 단층 구조는 그 방향에 따라 북북동(Set 1), 북북서(Set 2), 서북서(Set 3), 동북동(Set 4) 등 개의 군으로 구분할 수 있다.

터널 설계를 위한 암반 분류와 TMR-net 분석을 위하여 터널 구간을 지질 분포와 주요 지질 구조를 고려하여 7개 지질 구조구(geological domain)로 구분하였다. Fig. 9는 터널 굴착 심도의 지질분포

에 의한 7개 구조구의 구분을 보여주고 있다. 구조구 1(D1), 3(D3), 5(D5), 7(D7) 등 4개 구조구는 편마암이 배사부를 형성하고 있는 구조구이며, 그 외는 편암의 향사부이다.

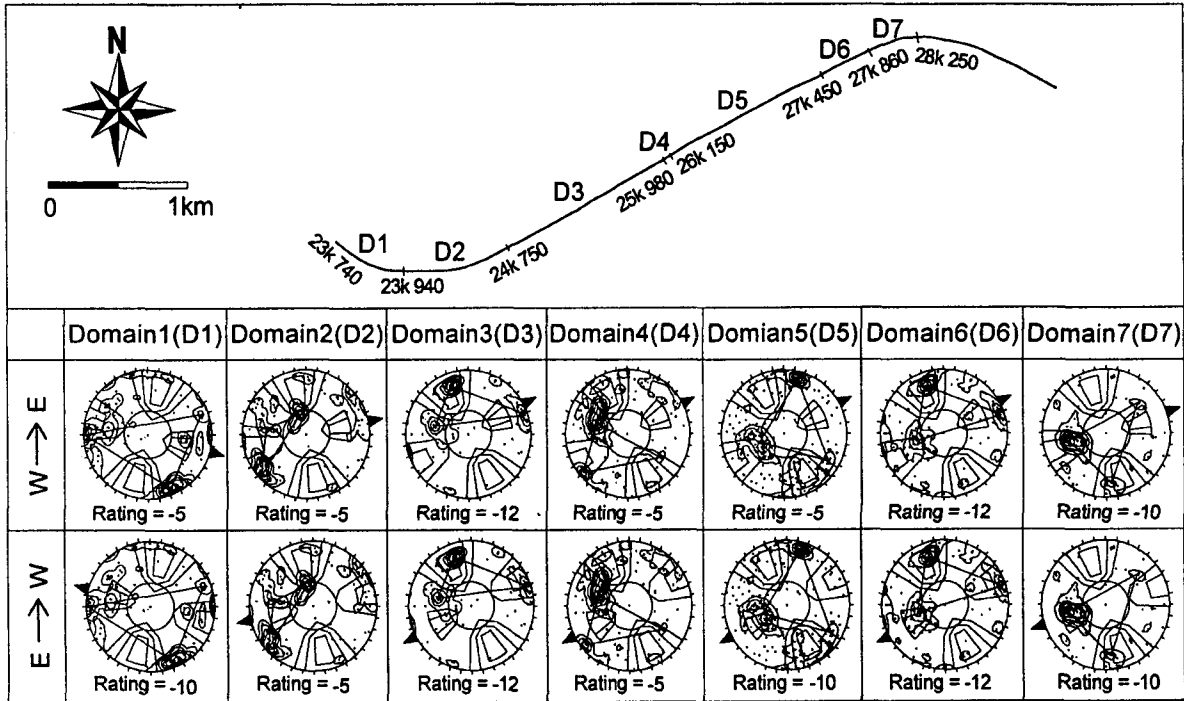


Fig. 9. TMR-net analysis for tunnel design

TMR-net 분석을 위해서는 터널 굴진 방향의 결정과 불연속면의 방향 자료가 필요하다. 터널 노선이 S자형의 굴곡된 형태를 보이므로, 터널의 축 방향은 각각의 구조구에 해당하는 터널 축의 평균 방향을 측정하였다. 또한 터널 굴착 방향의 영향을 비교하기 위하여 두가지 굴진 방향을 상정하였다. 그 하나는 서쪽으로부터 동쪽으로 향하는 굴진 방향이며, 다른 하나는 그 반대의 굴진 방향을 가질 때이다. 불연속면 방향 자료는 부지 조사 과정에서 지표지질조사를 통하여 1,500 개 이상의 방향 자료를 수집하였다. 이들 방향 자료 역시 그 조사 위치에 따라 7개 구조구에 해당하는 7개 자료군으로 구분하였다. Table 6은 이들 자료군을 두 가지 굴진 방향을 고려하여 TMR-net에 도시하여 분석한 결과이며, Fig. 9a는 서쪽에서 동쪽으로 굴진하였을 때의 TMR-net, Fig. 9b는 동쪽에서 서쪽으로 굴진하였을 때의 TMR-net 이다.

서쪽에서 동쪽으로 굴진하였을 경우 TMR-net 분석 결과, 구조구 3(D3)과 6(D6)은 북측벽(좌측벽)의 활동 가능성을 지시하고 있으며, 반면 구조구 7(D7)은 남측벽(우측벽)의 활동 가능성을 보여주고 있다. 하지만, 터널 막장면은 대부분의 경우 벽면 활동에 안정적인 것으로 평가할 수 있다. 또한 터널 천정부의 불안정 암괴에 의한 낙반 또는 썩기 활동의 우려는 대부분의 구조구에서 존재한다.

동쪽에서 서쪽으로 굴진하였을 경우에는 터널 축 방향은 동일하므로 양측벽의 활동 가능성을 가지는 구조구는 구조구 3(D3), 6(D6), 7(D7)로서 동일한 결과를 보이지만, 터널 막장면의 활동에 대해서는 앞서의 경우와 달리 많은 구조구(D1, D5, D7)에서 파괴 가능성이 높은 것으로 분석되었다. 따라서 동쪽에서 서쪽으로 굴진할 경우 그 반대의 경우에 비해 터널의 안정성 확보의 측면에서는 보다 불리한 것으로 평가할 수 있다.

Table 6. Results of the TMR-net analysis for the Site 1

Driving direction		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
W. to	Wall sliding	-	left	left	-	-	left	right
	Wedge failure	fall	slide	slide	slide	fall	slide	slide
E.	RMR rating	-5	-5	-12	-5	-5	-12	-10
E. to	Wall sliding	face	left	right	-	face	left	face
	Wedge failure	fall	slide	slide	slide	fall	slide	slide
W.	RMR rating	-10	-5	-12	-5	-10	-12	-10

굴진 방향 평가를 위한 TMR-net 분석 결과는 조사된 불연속면 자료에 대해 굴진 방향의 설정과 평가가 자유롭다는 측면에서 합리적인 암반 분류에 의한 구체적인 터널 지보 설계 뿐 아니라, 노선의 방향 설정 및 변경 등 터널 노선 선정에도 효과적인 방법임을 보여 주고 있다.

3.2 터널 굴착 단계에서의 적용: Site 2

TMR-net를 몇 개소의 터널 현장에 대해 1회 굴진 시 매 막장 단위로 수행되는 암반 검측 또는 막장 관찰 대장에 첨부하여 매 굴착 후 정밀 막장면 지질 조사와 TMR-net 분석 및 암반 분류를 수행토록 하였다. 이러한 작업은 현장 암반 검측에 소요되는 시간 및 인원에는 큰 변동 없이 막장 또는 전방의 지질에 대한 현장 기술자의 이해 증진과 대처 능력의 향상을 가져 왔다.

Site 2는 그 한 예로서 주라기 화강암 지역에 위치한 댐 시공 부지의 사례이며, TMR-net는 발전수로 터널의 시공 과정에 적용되었다. 발전수로 터널은 약 5m의 지름을 가진 원형 단면의 터널로서 380m(Sta. 2.00 - Sta. 21.00: interval 20m) 길이의 직선 터널이다. 터널 축의 방향은 N80° E이며, Sta. 2.00 - 7.00 구간은 동쪽에서 서쪽으로, Sta. 21.00 - 7.00 구간은 서쪽에서 동쪽으로 굴착되었다. 이 수로 터널의 지보 체계는 강지보, 록볼트 및 콘크리트 라이닝으로 구성되었으며, RMR에 근거해 총 5개의 표준 지보 형식으로 구분되었다. 표준 지보 형식은 경량에서 중량 지보 순으로 Type 1a, 1b, 1c, 2, 3이며, 발파에 의해 굴착되었다.

이 현장에서는 앞서 언급한 바와 같이 TMR-net가 첨부된 암반 평가 대장을 이용한 막장면 지질도 작성과 RMR 평가가 수행되었다. 그 결과는 즉각적으로 반영되어 지보 형식의 수정과 결정에 직접적인 영향을 주었으며, 특히 록볼트 등 추가적인 보강재의 설치 및 위치 결정에 역할을 수행하였다. 이외에도 TMR-net는 전반적인 터널 시공 관리에 사용되었다. Fig. 10은 터널 지질 전개도와 TMR-net 및 암반 분류 결과로 구성된 터널 지질 분석도의 일부이다.

Fig. 10은 일상적인 수행된 암반 분류 및 지질 조사 결과를 정리한 것으로서 터널 전구간에 걸쳐 작성되었으며, 지질 전개도는 편의에 따라 원형 단면을 사각 단면으로 가정하여 작성되었다. 여기에서 TMR-net는 매 막장 단위의 분석이외에 20m의 간격으로 구분된 구간 별로 다시 활용되었다. 이 작업은 콘크리트 라이닝 설치 이전에 개별 굴진장 단위의 지질 조사 및 암반 분류의 결과를 상호 검증하고, 유사한 암반 조건으로 구분하기 위하여 수행되었다. 주로 분석하고자 하는 대상은 막장면 활동을 제외한 측벽 활동 파괴의 가능성과 불안정 암괴의 파괴 유형 및 방향이다. Table 7은 20m 각 구간별로 재 도시한 TMR-net 분석 결과로서 이를 바탕으로 터널의 지보 형식이 최종적으로 재조정되었다.

이 결과에 따르면 Sta. 2.00-3.00, 9.00-10.00, 10.00-11.00, 20.00-21.00은 측벽부의 활동이 우려되는 구간으로서 분석되었으며, Sta. 2.00-3.00, 7.00-8.00, 11.00-12.00에서는 암반 블록의 낙반이 발생할 수

있는 불연속면 조건이 형성되어 있다. 그 외 구간에서는 Sta. 10.00-11.00 구간을 제외하고는 대부분 암반 블록의 활동 파괴가 가능한 것으로 분석되었다.

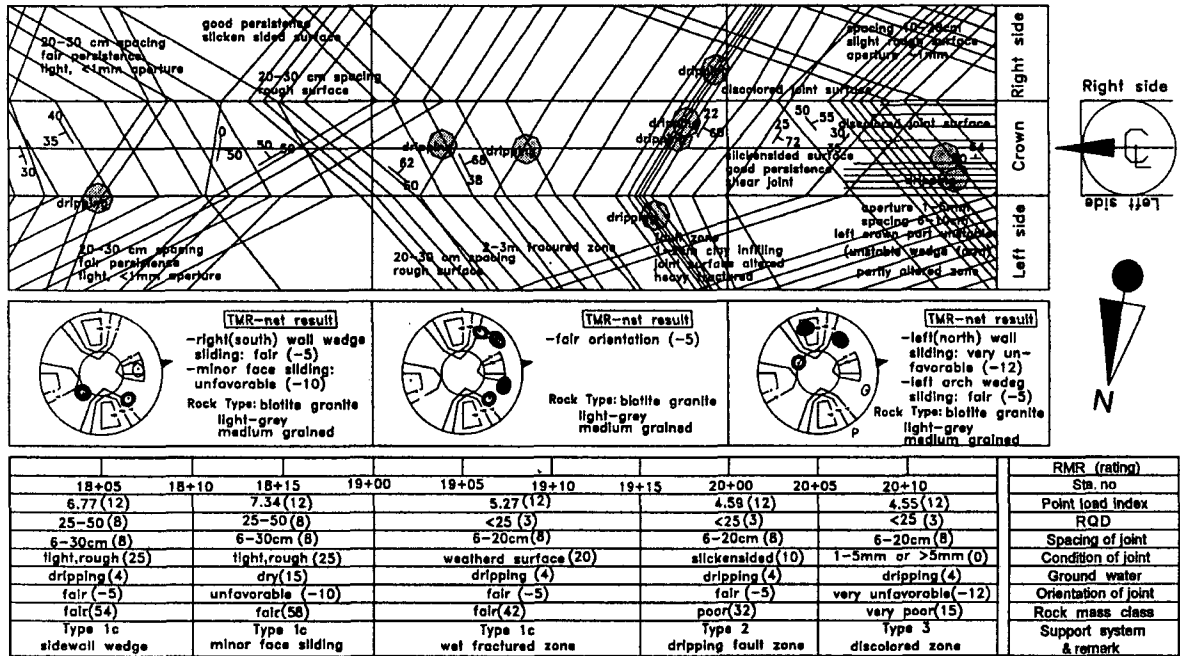


Fig. 10. Geological chart (Sta. 18.00 - 21.00)

Table 7. Results of TMR-net analysis in the Site 2

Sta. No.	Adjustment rating	Wall sliding	Wedge failure	Driving direction
2.00-3.00	-12	north	fall	E. to W.
3.00-4.00	-5	-	slide	
4.00-5.00	-5	-	slide	
5.00-6.00	-5	-	slide	
6.00-7.00	-5	-	fall	
7.00-8.00	-10	face	fall	W. to E.
8.00-9.00	-5	-	slide	
9.00-10.00	-12	south	slide	
10.00-11.00	-12	south	-	
11.00-12.00	-5	-	fall	
12.00-13.00	-5	-	slide	
13.00-14.00	-5	-	slide	
14.00-15.00	-10	face	slide	
15.00-16.00	-5	-	slide	
16.00-17.00	-5	-	slide	
17.00-18.00	-5	-	slide	
18.00-19.00	-10	face	slide	
19.00-20.00	-5	-	slide	
20.00-21.00	-12	south	slide	

이상의 결과에 의해 활동의 위험이 있는 구간에 대해서는 지보 형식이 경량인 경우, 위험 벽면을 대상으로 국부적인 록볼트 설치 등 보강을 추가하였다. 사례 터널과 같이 터널 굴착 중 또는 직후 단계에서의 TMR-net 분석은 실제 터널 현장에서 터널 기술자들이 지반 조건에 보다 능동적으로 대처할 수 있는 효과적인 정보를 제공할 수 있다.

4. 결 론

터널에 사용되는 경험적 암반 분류와 운동학적 해석의 장점을 결합하여 사용할 목적으로 TMR-net 기법이 제안되었으며, 실제 사례를 중심으로 그 적용성을 검토하여 보았다. TMR-net는 RMR 시스템에 기초하여 불연속면 방향 평가를 수행할 수 있는 중첩 극투영망으로서 실내 뿐 아니라 현장에서 간단하게 방법으로 터널에 대한 불연속면의 영향을 분석할 수 있다. 터널의 벽면 활동 범위는 양 측벽과 막장면을 수직 벽면으로 가정하여 SMR에서 사면에 적용된 기준을 활용하므로써, 다소 모호하고 단속적인 RMR의 불연속면 방향 평가 기준을 보완할 수 있었다. 이렇게 설정된 평가 기준은 TMR-net 상의 활동 범위 및 그 기준선으로 반영되었다.

터널에 대한 적용성 검토를 위하여 소개된 설계 및 굴착 단계의 두 사례는 투영망을 이용해 운동학적 해석 결과 뿐 아니라, RMR 보정을 위한 불연속면 방향 평가 점수를 직접 결정할 수 있는 TMR-net의 유용성과 그 적용 방법을 보여주고 있다.

설계 단계에서 TMR-net는 조사된 자료에 기초하여 주어진 터널 노선에 대한 지보 구간 설정에 사용될 수 있을 뿐 아니라, 노선 결정 및 굴진 방향의 평가에 효과적으로 사용될 수 있음이 확인되었다. 굴착 단계에서는 지반 조건 특히 불연속면의 방향에 대해 풍부한 분석 결과를 제공하므로써 암반 분류와 지보 선정 및 변경에 대해 합리적이고 신속한 대응을 할 수 있게 하였다.

사 사

이 연구의 일부는 지구환경과학부를 통한 BK21 프로그램에 의해 지원되었다. 이 작업에 지속적인 관심을 베풀어주신 동부건설(주)의 이순병 전무, 대덕 공영의 박남서 사장, 지오제니 컨설턴트의 김학수 박사께 감사드린다.

참 고 문 헌

1. 윤운상, 김학수, 김정환, 1997, RMR-net를 이용한 암반 분류의 적용, 지질학회지, 33(4), 202-210.
2. Bieniawski, Z.T., 1979, The geomechanics classification in rock engineering application. Proc. Symp. on Explo. for rock engineering: 97-106. Rotterdam: Balkema.
3. Francis, T.E., 1991, Determination of the influence of joint orientation on rockmass classification for tunnelling using a stereographic overlay, Quarterly Journal of Engineering Geology. 24, 267-273.
4. Romana, M.R. 1993. A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating, Hudson, J.A. (eds). Comprehensive Rock Engineering: 3, 575-601. UK: Pergamon Press.

5. Hoek, E. and Brown, E.T. 1980. Underground excavations in rock,. Inst. Min. Metall. London. England.
6. Farmer, I.W. and Shelton, P.D. 1980. Factors that affect the stability of underground rockbolt reinforcement systems. Trans. Inst. Min. Metall. 89, A68-83.
7. Pusch, R. 1995. Rock mechanics on a geological base. Elsevier.
8. Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics 6, 189-236.
9. Palmström, A. 1996. Characterizing rock masses by thr RMi for use in practical rock engineering. Tunnelling and Underground space technology, 11(2), 175-188.