암반불연속면의 지질공학적 특성 및 조사상의 문제 (불연속면 특성의 정량화를 중심으로)

김교원[1], Gyo-Won Kim

[1]경북대학교 지질학과 교수, Professor, Dept. of Geology, Kyungpook National University

개 요 : 암반 불연속면에 대한 조사는 국제 암반역학회(ISRM)에서 추천하는 조사법이 합리적으로 불연속면이 특성을 기재할 수 있는 방안이기 때문에 널리 적용되고 있다. 그러나, 이 안에서는 조사결과를 공학적 의미가 있는 암반특성치로 변환하는 방안에 대한 언급이 없다. 본고에서는 지질기술자들이 불연속면조사시 주로 사용하는 ISRM 추천안이 제시한 조사항목에 토목기술자들이 주로 사용하는 RMR 혹은 Q-system 분류안의 정량적인 값을 적용할 수 있을 지를 검토하였다. 이에 대한 관련기술자들의 관심이 모여질 때 정량적인 인자에 기초한 ISRM 조사법에 부합되는 암반분류안의 구축도 가능하리라 생각된다.

주요어 : 암반, 불연속면, 암반분류, RMR, Q-system

1. 서 언

지반이라 함은 흙과 암석뿐만 아니라 절리 등과 같은 간극과 이들을 충전하고 있는 지하수나 공기 등을 포함하는 포괄적인 의미의 지반을 말하며, 암반이라 함은 흙을 제외한 협의의 지반을 의미한다. 지반은 건설재료로서 뿐만 아니라 건설대상으로서 공사 중 및 공사후의 구조물의 안정성에 1차적으로 영향을 미치기 때문에 지반의 공학적 특성에 대한 이해는 매우 중요하다.

흙의 공학적 특성은 현장 및 실내시험을 통하여 비교적 간단히 정량적으로 파악할 수 있으나, 암반의 특성은 다양한 인자가 관계되기 때문에 공학적으로 간단히 정의하기 곤란한 경우가 많다. 대부분의 암반에서는 암석 자체의 강도보다는 암반에 포함된 불연속면이 암반전체의 공학적 특성을 지배하기 때문에 암반을 대상으로 하는 공사에서는 암석강도가 아무리 높다고 하더라도 불연속면에서의 파괴가 있을 수 있다. 따라서, 건설공사시의 안전성은 암석자체에 대한 평가가 아니라 전체적인 암반으로서의 평가가 이루어져야 한다.

암반은 암석의 강도와 불연속면의 특성에 따라 공학적으로 크게 다음과 같이 구분될 수 있다.

- 불연속면이 적어서 거동이 암석특성에 지배받는 암반
- 암석강도는 크지만 불연속면이 많아 거동이 불연속면의 특성에 지배되는 암반
- 암석강도가 낮고 불연속면도 많아 거동이 암석과 불연속면의 특성에 동시에 지배되는 암반

여기서 불연속면이 "많다 또는 적다"라는 의미는 구조물의 규모와 비교해서 평가할 때의 상대적인 의미이다. 즉, 직경 1 m의 터널주변 암반에서 절리간격이 0.5 m인 경우 불연속면은 대체로 적은 편에 속하지만 같은 위치에 직경 10 m의 터널이 계획되는 경우라면 불연속면은 상대적으로 많다고 볼 수 있을 것이다.

국내의 도로 및 터널 등의 건설시 노출되는 암반의 경우 대부분은 위의 두 번째 범주의 암반으로서 암반특성이 주로 불연속면에 지배를 받는 경우로 볼 수 있다. 따라서, 불연속면의 특성의 파악은 암반관련 건설공사의 가장 기본이 되는 조사사항이라고 볼 수 있다. 불연속면에서의 강도 및 변형특성은 실내시험 크기의 시료에서는 절리면 전단시험을 통하여 비교적 정확히 파악할 수 있으나, 이 경우 크기효과

에 의한 현장 특성치와의 상당한 오차가 예상된다. 현장전단시험이 가능한 경우라 하더라도 그 규모가 제한적일 수밖에 없으며 상당한 시험비가 소요되기 때문에 널리 적용되지 못하고 있다. 가장 좋은 방법이라고 할 수 있는 현장조사를 통한 특성 파악에는 다양한 조사 및 평가방법이 제시되고 있다. 그러나, 대부분은 정성적이고 주관적인 방법이기 때문에 조사자에 따라 상당한 특성치에 오차가 있는 실정이다. 이를 저감시키기 위하여 ISRM(International Society for Rock Mechanics)에서 표준안을 제시한 바 있다. 본고에서는 이 조사법에 대하여 논의하고자 한다.

2. 불연속면

공학적 의미의 암반 불연속면(discontinuity)이란 암반 내에 존재하는 인장강도가 작거나 또는 전혀 없는 역학적 결함을 총칭하고 암반에서 나타나는 모든 연약한 면을 총괄적으로 나타내는 용어로서 1960년대 후반부터 여러 저자(Fookes and Parrish, 1969; Attewell and Woodman, 1971; Priest, 1975; Goodman, 1976)들에 의하여 사용되기 시작하였다.

불연속면은 그 크기에서 작은 열극(fissure)에서 큰 단층(fault)까지 다양하다. 암반의 거동은 토질과 다르게 암반내에 발달하고 있는 불연속면의 발달특성(불연속면의 방향, 간격, 연속성, 간극, 충전물, 투수성, 강도 및 군수, 암괴의 크기 및 모양)에 따라 영향을 받으므로 암반에서의 각종 공사에서의 안정성에 미치는 이들의 영향을 고려하여야 한다. 특히 암반 사면에서의 강도 저하요소인 수압, 풍화, 불연속면의 존재 중에서 가장 중요한 요소는 불연속면의 존재이며, 그 종류도 다양하기 때문에 정확하게 측정, 파악하기도 쉽지가 않아 안정해석시 어려움을 주고 있다.

2.1 불연속면의 생성

불연속면은 주로 암석 생성과정에서의 내적인 힘에 의하여 형성된 태생적 불연속면과 암석생성후의 지각변동 등 외적인 힘의 작용으로 생성된 후천적 불연속면으로 구분되며, 특히 이 후천적 불연속면은 역학적인 암석 파괴면으로 강도가 약한 경우가 많다. 따라서, 불연속면의 생성은 암석의 종류와 암석이 위치하는 지역의 과거 응력과 밀접하게 관계된다.

암석은 지질학적으로 생성기원에 따라서 화성암, 퇴적암 및 변성암으로 구분하는데, 우선 각 암종별로 불연속면의 태생적인 생성과정을 살펴보자.

화성암(igneous rocks)은 마그마(magma)가 지하 혹은 지표에서 굳어져 만들어진다. 지하 깊은 곳(수십 km)에서는 심성암(화강암, 섬록암, 반려암 등)이 만들어지는데 고온의 마그마가 지중에 자리 잡은 후 주변 암석의 피복으로 인하여 서서히 냉각하면서 광물입자의 결정작용이 잘 이루어지며 공학적으로 비교적 균질한 암체가 된다. 이 과정에서 심성암 암체는 냉각에 의한 수축으로 체적이 감소하면서 인장균열이 발생하게 된다. 냉각과정에서 암체 내의 열원의 중심(대부분은 암체 하단부)을 중심으로 방사상의 서로 직교하는 2쌍의 고각의 균열이 만들어 질 것이다. 냉각된 암체는 지각변동기에 융기하게되고 상부의 수십 km에 달하던 토피가 침식으로 제거되고(unloading) 암체는 팽창하게 된다. 이러한 하중제거로 암체에는 하중의 작용방향과 직교하는 수평의 인장절리가 형성된다. 따라서, 암체가 형성된 위치에서 수직 융기한 경우에는 서로 직교하는 3조의 인장절리가 형성될 것이다. 그 예는 주변에서 흔히 관찰되는 화강암체에서 쉽게 접할 수 있다.

이에 반하여 화산암(유문암, 안산암, 현무암 등)은 마그마가 지표에 노출되어 급하게 냉각되어 형성되었기 때문에 광물입자의 결정작용이 불량하며 급냉하는 과정에서 체적수축으로 수직절리가 발달하게된다. 제주도의 병풍바위의 주상절리가 대표적인 예이다. 반심성암(석영반암, 빈암, 조립현무암 등)은 마그마가 주변암석의 기존의 불연속면을 따라 상승하다가 냉각 고결되었기 때문에 그 분포 규모가 크지 않고 대부분 맥암의 형태로 산출되며, 관입한 방향에 평행한 절리가 우세하다.

퇴적암은 그 기원에 따라 쇄설성 퇴적암, 화학적 퇴적암 및 유기적 퇴적암으로 나뉜다. 유기적 퇴적암은 석탄, 석유, 석회암 등이며 화학적 퇴적암은 석회암, 백운암, 처어트 등이 있으나, 본고에서는 국내에

가장 흔히 분포하는 쇄설성 퇴적암을 중심으로 논하고자 한다. 쇄설성 퇴적암은 구성 입자의 크기에 따라 역암, 사암, 미사암, 이암, 세일 등으로 구분되며, 이들은 기존의 암석이 풍화 작용으로 분해되어 유수, 바람 및 빙하 등의 운반매체를 통하여 운반 퇴적되어 만들어진다. 경상계 퇴적암은 유수에 의하여 운반되어 호수에 퇴적되어서 형성되었다. 따라서, 유수의 운반력 즉, 계절적인 강수량의 변화에 의하여 운반되는 흙의 입자크기가 달라지고 그에 따라 자갈, 모래 및 점토가 교호하는 경우가 대부분이며 이들 재료의 차이에 의하여 층리면이라는 불연속면을 형성한다. 호수 바닥에 쌓인 이들 퇴적물은 상부에 계속해서 쌓이는 퇴적물의 무게에 의하여 압축되고 호수 물에 포함된 고결물질($CaCO_3$, SiO_2 등)에 의하여 석화되었다. 이들 퇴적암은 층리면에 수직방향의 절리면을 많이 형성하는데 이는 암석의 석화과정에서의 상하층(사암 및 세일)의 재료의 차이에 기인한 차별 수축변위에 의한 것으로 추정되며 이 불연속면의 수직방향 연속성은 불량한 편이다. 경상계 퇴적암의 절리는 방해석 맥(calcite vein)이 충전되어 봉합된 경우도 있다. 기본적으로 쇄설성 퇴적암 지역에서의 태생적 불연속면은 층리면이 대표적이라 할 수 있으나 층리면 중 일부는 결합력이 크기 때문에 불연속면으로 볼 수 없는 경우도 있다. 즉, 모든 층리면이 불연속면인 것은 아니다. 강원도 지역에 분포하는 고생대 석회암의 용식공동도 불연속면의 하나로 볼 수 있을 것이나, 석회암에서의 층리면은 대체로 결합력이 우수한 경우가 많다.

변성암 중 국내에 널리 분포하는 편마암, 편암, 천매암 등은 기존의 암석이 고온 고압하에서 변성되어 형성된다. 따라서, 변성당시의 압력작용방향에 수직방향으로 광물들이 배열하게 되는 특징적인 변성구조(편마구조-편리, 엽리 등)를 가지게 된다. 이러한 변성구조는 특정한 광물이 모여서 만들어지기 때문에 그 경계면이 1차적인 불연속면이 될 뿐만 아니라 지표에 노출되는 과정에서 변성당시의 압력이 소멸되면서 체적팽창에 의한 인장절리가 변성구조와 같은 방향으로 만들어진다. 또한, 이들 변성암은 광물의 풍화저항도에 따라서 차별풍화를 받게되어 공사시에 불리하게 작용하는 경우가 많다. 이외에 접촉 변성암으로 혼펠스가 있으나 이는 화강암 접촉부의 퇴적암에서 제한적으로 분포하며 불연속면은 퇴적암의 절리 등의 잔류구조와 화강암 관입시의 응력에 기인하는 불연속면이 있으나 열수에 의한 규질작용으로 불연속면이 봉합되어 대체로 견고한 암체를 이루는 경우가 많다.

이상은 태생적 원인에 기인한 불연속면으로 주로 냉각, 하중제거 등 인장력에 의한 불연속면이 우세하나 암석은 생성된 후 오랜 지질시대를 거치면서 다양한 지질변천의 과정을 겪게 된다. 지각변동시에는 바다가 육지가 되고 육지가 바다가 되는 대격변이 있으며 그 와중에 암석에 큰 응력이 작용하며 파괴되어 단층, 파쇄대, 절리 등 불연속면을 생성한다. 그 중 횡방향 압축력이 작용하는 경우에는 전단절리나 역단층이 만들어지며 인장력이 작용하면 인장절리 혹은 정단층이 만들어진다. 압축력에 의한 불연속면은 통상 인장력에 의한 것 보다 표면 마모가 수반되어 더 매끄럽고 평탄한 경우가 많기 때문에 불연속면상에서의 전단강도가 약하게 된다.

이와 같은 암석생성 후 주변응력 변화에 의한 2차적인 불연속면은 다음 그림 1과 같이 주응력의 작용방향에 따라 불연속면의 방향성과 특성이 결정된다.

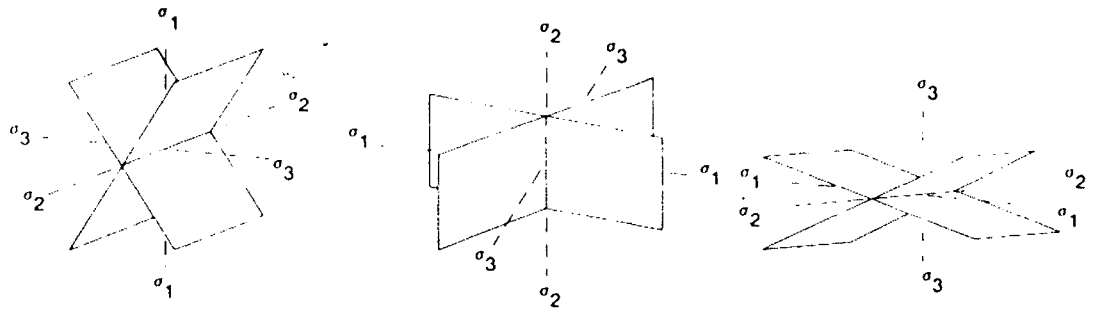

그림 1. 주응력방향과 불연속면의 방향

2.2 불연속면의 분류

암반 불연속면의 종류는 건설공사의 안정성 측면에서 중요한 판단자료를 제공하며 불연속면의 규모와 성인에 따라 다음과 같이 분류한다.

① 단층(fault) : 어느 면을 경계로 양쪽 암석이 상대적으로 변위가 일어난 부분으로 단층대, 단층파쇄대, 단층각력, 단층비지 등을 포함하기도 한다.

② 절리(joint) : 암석의 역학적인 연속성이 깨진 암반 속에 포함되는 틈으로 상대적인 변위가 없거나 아주 적은 것을 지칭하며, 같은 방향성에 속하는 절리를 절리군이라 칭하고, 성인에 따라 전단절리, 인장절리로 구분된다.

③ 층리(bedding plane) : 퇴적암 내에 존재하며 하나의 층과 층이 경계를 이루는 면으로 구성입자, 광물배열, 색조 등의 차이에 기인하며 층리면 중에는 결합이 좋아서 불연속면이 아닌 것도 있다.

④ 벽개(cleavage) : 지층의 습곡이나 변형에 따라 형성된 간격이 좁은 틈

⑤ 편리(schistosity) 및 편마구조(gneissosity) : 각각 편암 및 편마암에 발달된 변성구조로 변성당시의 압력하에서 광물의 방향성 배열로 생성되며 불연속면을 형성하는 경우가 많다.

이외에 fracture, fissure 등 다양한 명칭이 사용되기도 하나 이들은 절리 혹은 벽개의 범주에 포함될 수 있을 것으로 생각된다.

3. 불연속면의 조사

불연속면의 조사목적은 ①지질학적 구조조사, ②암반분류, ③암반변형 및 안정성, ④유체유동, ⑤암발파 및 절단, ⑥지보설계의 수치적·해석적 모델링 입력자료 제공 등에 있다. 건설공사에서는 불연속면이 암반 거동에 미치는 영향을 이해하고 또 이를 설계 및 시공목적에 적용시키기 위해서 조사가 수행된다. 그러나, 전술한 바와 같이 조사결과의 개인적 오차가 많아서 설계 및 시공시 많은 문제가 대두되었으며 그에 따라 조사방법의 표준화가 요구되었다. 이러한 조사방법의 표준화야말로 복잡하게 발달하는 불연속면의 특성을 정량화하고 객관화 할 수 있을 것이다.

3.1 노두면 조사

노두면에서 불연속면 조사를 실시하기 전에 대상 지역의 암종 및 주요 지질구조를 나타내는 지질도가 작성되어야 한다. 가장 효과적이고 정확한 불연속면 조사 방법을 고안하는 것은 그 지역 지질조건에 대한 충분한 정보가 취득된 후에야 가능하다.

현장에서의 불연속면 조사방법은 주로 측선측정법(line scanning) 혹은 조사창 측정법(window method)이 사용되며 간혹 시굴법이 사용되기도 한다. 이들 방법은 Fookes and Denness(1969), Attewell and Farmer(1976), Baecher and Lanney(1978), ISRM(1978), Priest and Hudson(1981), Rouleau and Gale(1985), Kulatilake *et al.*(1990) 등에 의해 연구된 바 있다.

① 측선측정법 : 일련의 라인 스캐닝(line scanning)을 이용하는 것으로 서로 다른 두 개의 측선을 가능한 한 처음의 측선과 수직을 이루도록 위치시키고 테이프를 따라 테이프와 교차하는 불연속면의 거리 및 특성을 기록한다(Piteau, 1971). 이때 측선은 직선을 유지하여 시추작업에서와 같은 효과를 기대할 수 있도록 하고 각 측선의 시작과 끝은 불연속면이 되도록 하며 측선의 trend와 plunge를 기록해 둔다(Priest, 1993).

이 경우 단일 측선만으로는 자료 취득에 편견을 피할 수 없다. 즉 측선을 교호하지 않는 주요 불연속면의 특성을 기재할 수가 없다는 점이다. 이를 해소하기 위해서는 수직 방향의 또 다른 측선의 설정이 필요한데 터널에서는 연장이 충분하지 못할 가능성이 많으며 암반사면에서는 사면의 상부에서 바닥까지 조사를 해야 하거나 조사자의 키를 넘는 수직 측선에 대한 조사의 한계가 있다.

② 조사창 측정법 : 이는 균열군의 도화(mapping)방법을 사용하는데 이 방법에 의해 적정 간격으로

위치한 6×2m의 구역 내에 발생하는 모든 절리를 기록하는 암석의 표면에 대한 면적 샘플링(area sampling)방법이다. 이 경우 조사 정밀도 향상을 위해 조사창을 무한히 많이 설정할 수도 없고 또 창의 크기를 크게만 할 수도 없다. 가능하면 등간격의 조사창 설정이 용이하나 창과 창 사이에 발달하는 주요 구조선이나 단층 등이 간과될 수 있다.

③ 시굴법 : 신선한 절리를 기록할 수 있으나 많은 비용이 소요되며 매번 적절한 시굴현장의 확보가 쉽지 않을 수 있다.

3.2 시추코어 조사

시추조사가 지하지질 상태를 직접 확인할 수 있다는 장점이 있는 반면 불연속면 조사에서의 필수적 사항인 방향성 및 충전물, 지하수 상태 등에 대한 정보의 취득에 한계가 있다. 즉 굴착 과정에서 코어가 회전할 가능성이 있어 암반이 가지고 있는 불연속면의 방향을 알기 위해서는 특별한 장비가 필요하며 코어의 지름이 작아서 불연속면의 연장 등 크기를 알 수 없다. 또 충전물질이 굴착 과정에서 씻겨 나가거나 사용된 이수재의 침전이 생길 수도 있다.

Rosengren(1970)은 공학적 목적으로 시추코어를 조사할 수 있는 지침서를 제시하였는데 특히 시추작업자의 보고서와 암추 자체에 대한 정보의 취득에 주안점을 두고 있다. 작업일보는 굴착작업, 코어손실, 비트 교체, 이수(slurry)의 색깔과 손실, 지하수위 등과 같은 다양한 정보를 제공할 수 있으며 굴착작업자의 감각도 중요한 정보가 될 수 있다. 즉 장비의 과도한 소음이나 진동, 굴착속도 등은 지하 지질의 또 다른 정보를 제공해 준다.

4. 불연속면의 기재와 특성의 정량화

불연속면을 포함하는 암반의 강도특성은 다양한 인자에 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 Piteau(1970, 1973)는 설계단계에서 가장 큰 영향을 미치는 불연속면의 특성으로 방향성, 규모, 빈도, 표면형태, 생성형태 및 충전물이라고 하였다. ISRM(1981)에서는 기술자 개인오차를 최소화하고 암반의 정량적 평가를 위하여 불연속면의 방향성(orientation), 간격(spacing), 연속성(persistence), 거칠기(roughness), 벽면강도(wall strength), 간극(aperture), 충전물(filling), 침투수(seepage), 군수(number of sets) 및 암괴규모(block size) 등 10개의 조사 항목을 선정하고 각 항목의 기준을 제시하였다.

그러나, ISRM에서는 불연속면의 기재 방법과 각 기재항목에 대한 등급만 제시하였을 뿐 기재한 결과인 등급에 따른 불연속면의 공학적 특성을 정량화하는 방안에 대하여서는 언급이 없기 때문에 조사된 결과를 설계자가 이용하는 데에 한계가 있다. 그동안 불연속면을 포함하는 암반특성을 정량화하기 위하여 많은 암반분류가 제시되었으며(Wickham *et al.*, 1972; Franklin, 1976; Laubscher, 1977;), 그 중 다양한 인자를 고려하여 암반특성의 정량화하고 있는 Bieniawski(1979)의 RMR 분류와 Barton *et al.*(1974)의 Q-system 분류가 널리 적용되고 있다.

RMR 분류는 분류인자로 암석강도 15점, RQD 20점, 절리간격 20점, 절리상태(연장성, 간극, 거칠기, 충전물, 풍화도 각 6점) 30점 및 지하수 상태 15점을 각각 5등급 내외로 구분하여 점수를 구하여 합산한 결과를 암반등급으로 하는 반면, Q-system에서는 RQD 10~100, 절리군수 Jn 0.5~20, 절리면 거칠기수 Jr 0.5~4.0, 절리면 변질수 Ja 0.75~20, 응력저감인자 SRF 0.5~10, 절리수 저감인자 Jw 1.0~10의 값을 결정하여 다음 수식으로 Q값을 산정한 후 Q값의 범위를 지수 배(예 Q=0.001~0.01 exceptionally poor, Q=10~40 good 등)로 구분하여 암반분류를 실시한다. 따라서, RMR 값과 Q 값의 수치를 직접 대비하는 것은 무의미하며 이들간의 관계는 식(2)와 같이 제시되었다(Bieniawski, 1976).

$$Q = \frac{RQD}{Jn} \cdot \frac{Jr}{Ja} \cdot \frac{Jw}{SRF} \quad (1)$$

$$R = 9 \ln Q + 44 \quad (2)$$

본고에서는 ISRM이 추천하는 불연속면의 정량적 기재방법에서 제시된 등급과 RMR 혹은 Q-system에서 제시한 특성의 정량적 수치를 대비하여 ISRM의 추천안의 정량화 가능성을 생각해 보았다.

① 방향성(orientation)

공간상의 불연속면의 방위는 주향과 경사로 표시하거나 경사방향과 경사각으로 표시하는데, 구조물과의 상대적인 방위에 따라 안정성이 크게 좌우되기 때문에 암반거동의 방향성 평가의 중요한 인자이다.

- 주향과 경사 $N30^{o}E \quad 50^{o}SE$
- 경사 방향과 경사각 120 / 50
- 결과의 도시법 : Rose diagram, Block diagram, Stereonet 등

② 간격(spacing)

인접 불연속면 사이의 최단거리로 표시되고 간격이 조밀할수록 암반강도는 크게 저하된다. 절리간격 S는 줄자와 나침반으로 측정된 최빈거리(modal distance, d_m)를 측선과 불연속면의 사이 각 α로 보정하여 구하며($S = d_m \cdot \sin\alpha$), 표 1과 같이 구분한다. 이 구분은 RMR 분류의 절리 간격 구분 범위와 일치하며, 절리간격에 따른 RMR(R3)의 상관성은 그림 2와 같다.

절리간격은 사실 구조물의 규모와 상관되어 영향을 미치게 되므로 구조물과의 상대적 규모로 연속적인 평점을 부여하는 방안이 바람직할 것으로 생각되며, 또한 전체 암반거동 지배인자 중 절리간격의 비중을 RMR에서는 20%로 고려하였지만 이 비율의 적정성에 대하여 사례를 통한 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

표 1. 절리의 간격 분류와 RMR(R3)의 대비

description	spacing	RMR(R3)
극히 좁은 간격	< 20mm	
매우 좁은 간격	20~60 mm	5
좁은 간격	60~200 mm	8
중간 간격	200~600 mm	10
넓은 간격	600~2000 mm	15
매우 넓은 간격	2000~6000 mm	20
극히 넓은 간격	> 6000 mm	

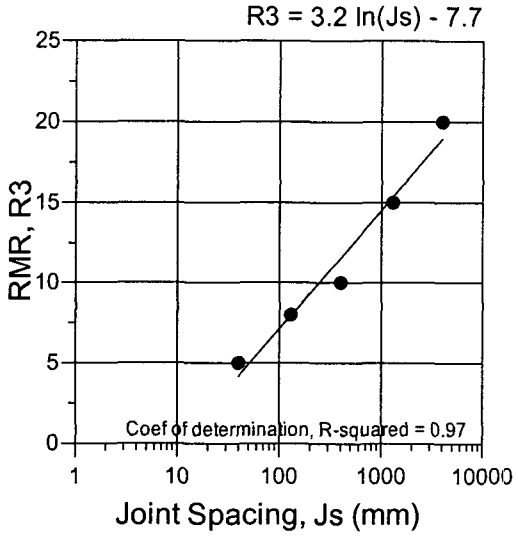

그림 2. 절리간격과 RMR(R3)의 상관성

③ 연속성(persistence)

노두에 나타난 불연속면의 자취 길이로 다음과 같이 분류하는데, 이 등급 구분범위가 RMR의 절리면 상태 중 연장성과 일치하며 이들 상관관계를 도시하면 그림 3과 같이 상당히 우수한 상관성을 보인다.

절리면의 연속성 또한 구조물과의 상대적인 규모에 따라 연속적인 평점을 부여하는 것이 바람직하며 RMR에서는 6%의 비중을 두었으나 이의 적정성에 대한 평가도 필요할 것으로 보인다.

표 2. 연속성의 분류와 RMR(R4a)의 대비

description	persistence	RMR(R4a)
매우 낮은 연속성	< 1 m	6
낮은 연속성	1~3 m	4
중간 연속성	3~10 m	2
높은 연속성	10~20 m	1
매우 높은 연속성	> 20 m	0

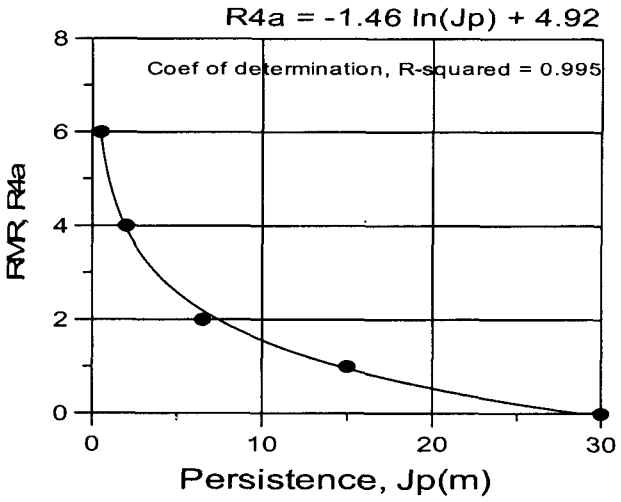

그림 3. 절리연속성과 RMR(R4a)의 상관성

④ 거칠기(roughness)

불연속면 표면의 거칠기 또는 굴곡정도는 전단강도에 큰 영향을 미친다. 특히, ISRM에서는 Barton and Choubey(1977)의 연구결과를 인용하여 벽면강도(JCS)와 절리면 거칠기 계수(JRC)로부터 최대 마찰저항각을 산출하는 경험식을 제시하였는데 JRC는 그림 4로부터 구하여 진다. 그러나, 실제의 절리면을 관찰하는 경우 그림에서 제시한 스켄라인의 어느 패턴에 부합되는지의 여부를 결정하기는 쉽지 않으며 개인간의 오차도 크다. 특히, 그림에서는 한정된 규모의 거칠기면을 제시하고 있기 때문에 진폭 10cm 이상의 굴곡(undulation)이 있는 절리의 경우에는 그림을 참조하여 JRC 값을 결정하기가 매우 어렵다.

$$\phi_{peak} = (JRC)\log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma'_n}\right) + \phi_r \quad (3)$$

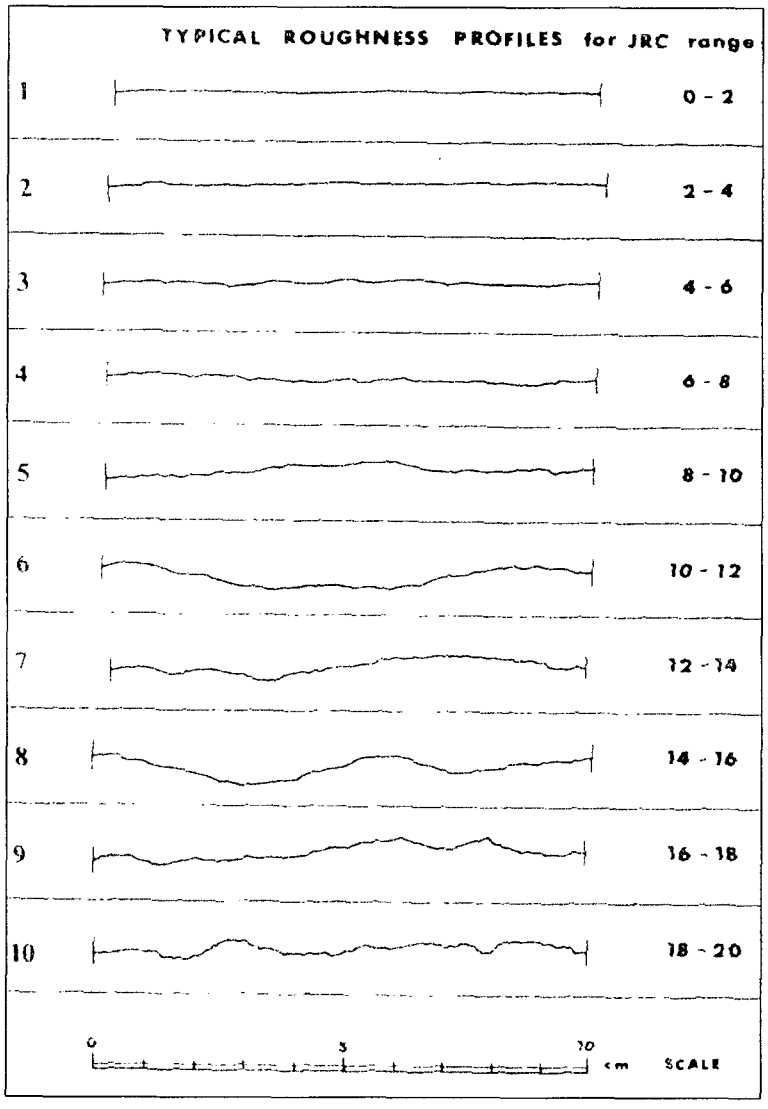

그림 4. 절리단면에 따른 JRC 값

만일 절리면의 굴곡이 제한적인 경우라면 그림을 참조로 JRC 값을 결정할 수 있을 것이다. 암반의 잔류 마찰저항각은 통상 25~35° 정도로 볼 수 있기 때문에 안전측으로 하한치 25°를 고려하고, 또 통상적인 건설공사가 이루어지는 수십미터 정도의 심도에서는 벽면강도가 절리면의 연직응력의 최소 10배 이상이 된다고 가정할 때 안전측의 최소 ϕ_{peak} 값을 다음과 같이 구할 수 있을 것이다.

$$\phi_{peak(\min)} = JRC + 25 \qquad (4)$$

또한, ISRM에서는 절리면의 거칠기를 정성적으로 표현하였는데, 정확히 대비하기는 곤란하지만 그림 4를 참조로 표3과 같이 각 등급에 JRC를 부여할 수 있을 것이며 RMR 분류의 R4c의 정량적 수치와 개략적으로 대비할 수 있을 것이다. 여기서, JRC와 RMR(R4c)의 상관관계는 그림 5와 같이 추정할 수 있다. 절리면의 거칠기는 RMR에서는 6%의 비중을 두었으나 이의 적정성에 대한 평가도 필요할 것으로 보인다.

표 3. 거칠기의 분류와 개략적인 정량화

Grade	Roughness		JRC	추정 ϕ_{peak}	RMR (R4c)	Q(Jr)
	Large scale	Small scale				
I	Stepped	Rough	18	43	6	4.0
II		Smooth	15	40	5	3.0
III		Slickensided	9	34	3	1.5
IV	Undulate	Rough	13	38	5	3.0
V		Smooth	9	34	3	2.0
VI		Slickensided	4	29	1	1.5
VII	Planar	Rough	7	32	3	1.5
VIII		Smooth	4	29	1	1.0
IX		Slickensided	1	26	0	0.5

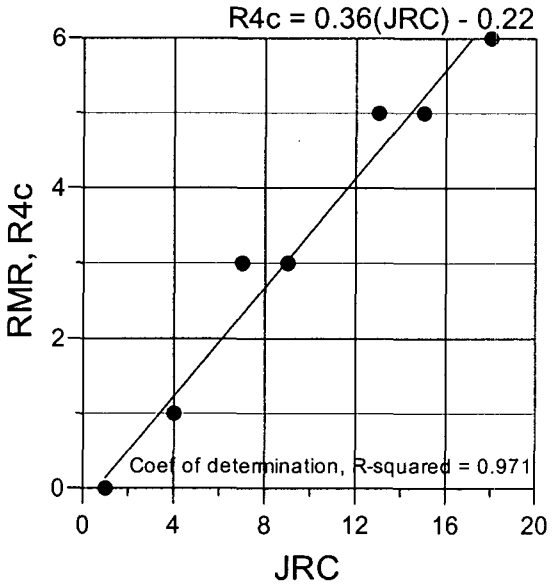

그림 5. JRC와 RMR(R4c)의 상관성

⑤ 벽면 강도(wall strength)

불연속면 상에서의 평균 압축강도로 벽면의 풍화나 변질정도에 따라 암석강도보다 작으며, 불연속면의 전단강도에 중요한 요소이다. 불연속면에 충전물이 없는 경우에 벽면강도는 표4와 같이 구분하며 풍화도에 따라서 표 5와 같이 구분한다. 암석의 강도는 풍화도 뿐만 아니라 암종에 따라서 달라지기 때문에 표 4와 5를 대비시킬 수는 없다. 따라서, RMR R4d와 벽면강도와의 대비는 곤란하지만 ISRM에서 정성적인 표현으로 주어진 풍화등급을 RMR의 R4d와 대비하여 표 5에 나타내었다.

절리면의 벽면강도와 풍화등급을 동시에 포함하는 가칭 벽면 건전도 지수(wall soundness index)를 도입하면 정량적 수치로 표현 가능할 지 모른다. 예를 들면, 풍화등급이 강도에 미치는 영향을 I 100%, II 80%, III 60%, IV 40%, V 20% 및 VI 5% 등으로 설정하고 이를 벽면강도(혹은 점하중지수)에 곱하여 얻어지는 지수를 벽면건전도지수라고 하여 암반등급의 한 기준으로 고려하는 방안이 있을 것이다.

⑥ 간극(aperture)

불연속면 양쪽 벽면 사이의 수직거리이며, 아래와 같이 분류된다. ISRM에서는 간극의 구분 범위와 정성적 설명만 제시하고 있으며 이들이 암반등급구분에 어떤 영향을 미치는지에 대한 언급은 없다. 따라서, 등급구분이 RMR의 그것과 다소 차이가 있으나 개략적으로 표와 같이 대응할 수 있을 것이며, 이들의 상관성은 그림 6과 같다.

표 4. 벽면강도의 구분

grade	description	uniaxial compressive strength (MPa)
R0	extremely weak rock	0.25~1.0
R1	very weak rock	1.0~5.0
R2	weak rock	5.0~25
R3	medium strong rock	25~50
R4	strong rock	50~100
R5	very strong rock	100~250
R6	extremely strong rock	>250

표 5. 풍화등급과 RMR(R4d)의 대비

term	grade	RMR(R4e)
신선	I	6
약한 풍화	II	5
중간 풍화	III	3
심한 풍화	IV	1
완전 풍화	V	0
잔류토	VI	

간극의 크기는 벽면의 거칠기와 굴곡에 따라 영향이 좌우될 것이므로 절대적인 크기뿐만 아니라 일정 길이 혹은 면적의 절리면에서의 굴곡도(진폭)에 대한 상대적인 크기를 고려하여 분류기준으로 설정하는 것이 타당할 것으로 보이며, 또한 간극크기의 비중을 RMR에서는 6%로 두었으나 이의 적정성에 대한 평가도 필요할 것으로 보인다.

표 6. 간극의 정성적 표현과 RMR과의 대비

aperture	description		RMR (R4b)
<0.1mm	Very tight	Closed	6
0.1~0.25mm	Tight		5
0.25~0.5mm	Partly open		4
0.5~2.5mm	Open	Gaped	3
2.5~10mm	Moderately wide		2
>10mm	Wide		1
1~10cm	Very wide	Open	0
10~100cm	Extremely wide		
>1m	Cavernous		

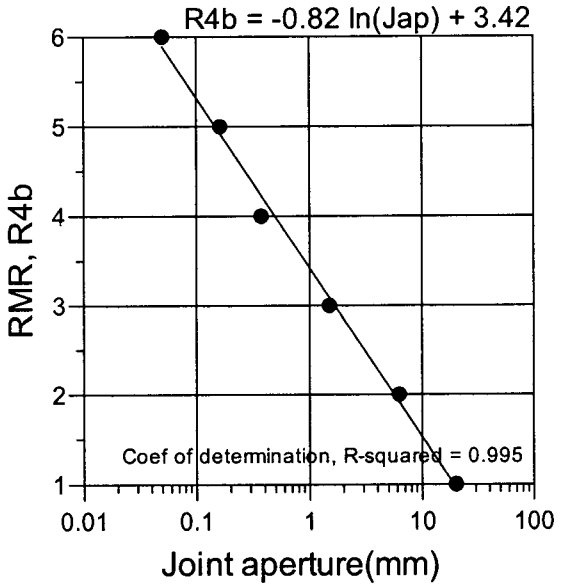

그림 6. 간극 크기와 RMR(R4b)값의 상관성

⑦ 충전물(filling)

불연속면의 벽면 사이의 대표적인 충전물로는 모래, 실트, 점토, 각력, 비지(gouge), 압쇄암(mylonite) 등이며, 또한 광물의 얇은 코팅과 석영 또는 방해석으로 봉합된 불연속면도 포함된다. 충전물이 있을 경우 절리거동은 충전물에 영향을 받으며, 충전물이 연약한 점토일 경우 전단저항력은 현저히 감소하게 된다. ISRM에서는 충전절리면의 다음 특성을 기재하도록 하였고 충전물이 점성토인 경우 강도를 표 7과 같이 구분하였다.

- 기하 형태 : 폭, 벽면 거칠기, 야외 스케치
- 충전물 형태 : 광물학, 입자크기, 풍화도, 흙의 특성, 팽창잠재성
- 충전물 강도 : 강도지수, 전단강도, 과압밀비, 변위
- 침투수 : 함수비, 투수성

표 7. 점토질 충전물의 강도 구분

grade	description	approx. range of uniaxial compressive strength (MPa)
S1	very soft clay	<0.025
S2	soft clay	0.025~0.05
S3	firm clay	0.05~0.10
S4	stiff clay	0.10~0.25
S5	very stiff clay	0.25~0.50
S6	hard clay	>0.50

RMR 분류에서는 충전물의 두께와 강도에 따라서 0~6점을 부여하였는데 충전물 두께 5cm를 기준으로 하였고, 강도는 '견고' 혹은 '연약'으로 만 구분하고 있어서 ISRM에서 제시한 표 6과 대비가 곤란하다. Q-System 분류에서는 충전 절리의 특성을 표와 같이 밀착 절리면, 10cm 이내의 절리면 및 그 이상의 간극으로 전단시 절리면이 접촉될 수 없는 경우로 구분하여 절리면 변질계수(Ja)를 결정하고 있다. 여기서 얻어진 Ja 값은 Q 값 결정 시 분모로 사용되므로 Ja는 절리면의 마찰저항각과 역의 관계에 있음을 알아야 한다.

Q-System에서는 정성적인 설명에 상응하는 Ja 값을 제시하고 그에 따른 개략적인 ϕ_r 값을 표 6과 같이 명시하고 있는데, 이들 상관관계는 다음 그림과 같다. 여기서, 일반적으로 불연속면내에 있는 조도의 진폭(a)과 충전물질의 두께(f)의 비, 즉 f/a가 140% 이상일 때는 전단시 절리면 접촉이 없다고 볼 수 있으며 절리면의 거동은 충전물질의 역학특성에 지배된다고 알려져 있기 때문에, 충전물의 두께가 두꺼워 벽면접촉이 없는 경우의 값들은 제외하였다.

불연속면 충전물의 두께는 간극크기와 밀접하게 관계되므로 이 인자는 간극크기와 동시에 고려하여 기준으로 삼는 방안이 강구됨이 좋을 것이다. 충전물은 점착력이 있는 경우 동일한 크기의 개방 간극보다 높은 강도를 보일 수도 있기 때문에 충전물 자체의 강도특성파악이 필요할 것이다.

표 8. Q-system에서의 절리면 변질계수와 ϕ_r 값

4. 절리면 변질계수	Ja	ϕ_r
a. 밀착 절리면		
A. 견고하게 밀착 또는 석영 등으로 봉합된 불투수성 절리	0.75	-
B. 변질되지 않은 절리		
C. 약간 변질, 비연질선 광물피막, 사질입자, 암편 협재 절리	1.0	25~35
D. 비연질성 실트질 또는 점토질 피막의 절리	2.0	25~35
E. 연질 또는 저마찰력의 점토피막(카오린, 운모, 활석, 석고, 흑연 등) 절리, 또는 불연속성 소량의 팽창성 점토피막 (1-2mm)의 절리	3.0 4.0	20~25 8~16
b. 절리면이 10cm 이내로 밀착		
F. 사질입자, 무점토의 암편 협재절리	4.0	25~30
G. 연속성의 고압밀 비연질 점토 광물 충전 절리(1-5mm)	6.0	16~24
H. 연속성의 중저압밀 연질 점토 광물 충전 절리(1-5mm)	8.0	12~16
J. 연속성의 팽창성 점토충전 절리(<5mm, 팽창성 점토의 함유율, 지하수에의 노출 정도에 따라 Ja를 조정함)	8.0~12.0	6~12
c. 전단시 절리면 접촉이 없는 경우		
K. 풍화변질 또는 파쇄암편 및 점토대(G, H, J항의 점토상태 설명 참조)	6.0, 8.0, 또는 8.0~12.0	6~24
L. 비연질성의 실트질 또는 모래질 점토대	5.0	-
M. 두꺼운 연속 점토대(G, H, J항의 점토상태 설명 참조)	10.0, 13.0 또는 13.0~20.0	6~24

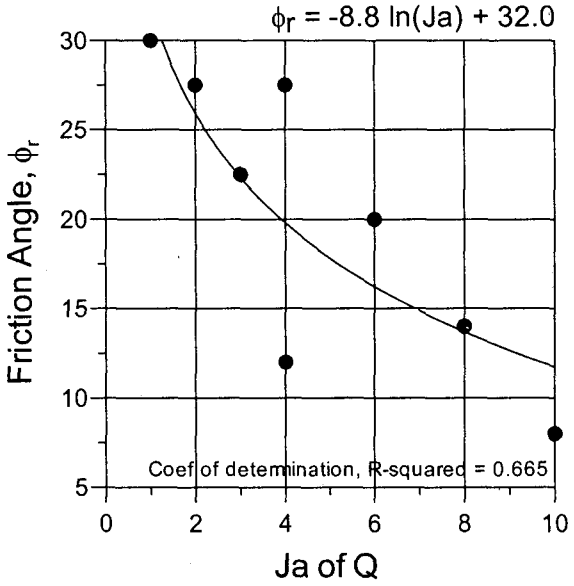

그림 7. Q-system에서의 Ja와 ϕ_r의 상관성

⑧ 침투수(seepage)

암반 또는 불연속면에서 보이는 침투수 또는 습윤 정도이며, 물에 의한 풍화를 짐작할 수가 있다. 또한 지하수위는 수압을 형성하여 결과적으로 전단저항력을 감소시키거나 지하수의 유입은 충전물질을 암반 밖으로 씻어 내기도 한다. 침투수는 충전 및 비충전된 불연속면에 따라 구분할 수 있고 ISRM에서는 다음 표 9와 같이 분류한다.

지하수와 절리면 특성의 상관성에 대한 RMR 및 Q-system에서의 정성적 표현과 그에 상응하여 제시한 정량적 수치를 ISRM의 등급에 개략적으로 대비시킨 결과는 표 9와 같으며, RMR 및 Q-system의 지하수 영향인자의 상관성은 그림 8과 같다. 침투수의 영향은 RMR에서는 15%의 비중을 두었고 Q-system에서는 0.2~1.0 즉, Q값에서의 500%의 변화가 가능하도록 되어있으나 이의 적정성에 대한 평가도 필요할 것으로 보인다.

표 9. 불연속면의 침투수

구분	grade	description	RMR(R5)	Q(Jw)
비충전 불연속면	I	아주 밀착 건조하여 투수성 없음	15	1.0
	II	물이 흐른 증거 없이 건조	15	1.0
	III	건조하지만 물이 흐른 증거 있음	10	1.0
	IV	습하나 자유수 없음	7	1.0
	V	침투수 보이고 가끔 물이 떨어지나 연속적 흐름 없음	4	0.66
	VI	연속적인 물의 흐름을 보인다.	0	0.5
충전 불연속면	I	과압밀 충전물로 건조하며 투수성 없음	15	1.0
	II	충전물이 습하나 자유수 없음	10	1.0
	III	충전물이 젖었고 가끔 물이 떨어짐	7	0.66
	IV	충전물의 유실 흔적이 있고 계속 물이 흐름	4	0.5
	V	충전물이 국부적 유실되었고 상당한 물이 흐름	0	0.33
	VI	충전물이 완전 유실되고 굴착 직후 아주 높은 수압	0	0.2

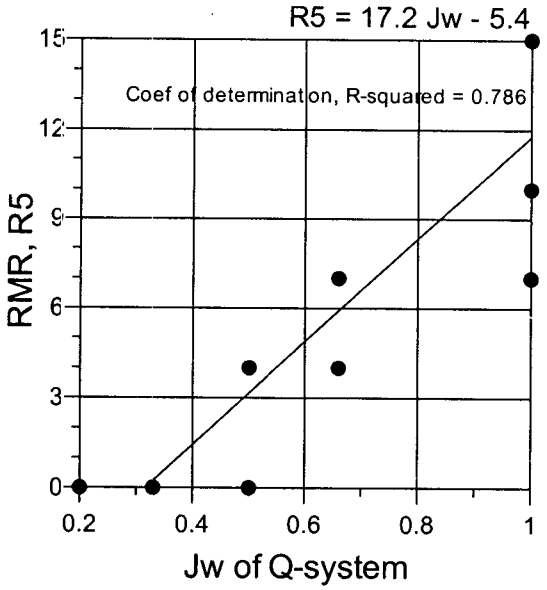

그림 8. Q(Jw)와 RMR(R5)의 상관성

⑨ 군수(Number of sets)

절리군수를 기재할 때 규칙적인 주 절리와 임의의 부수 절리를 구분하여야 한다. 일반적으로 규칙적인 절리는 연장성이 좋으며 동일 절리군은 대체적으로 평행하게 발달하게 된다. 절리의 군수에 따라 다음 표와 같이 등급을 메긴다. RMR에서는 절리군수를 영향인자로 고려하고 있지 않으며, Q-system에서는 절리군수에 따라 결정된 Jn를 분모로 사용하는데 표와 같이 최대 20배로 Q값에 영향을 미친다. Jn이 Q값 결정에 분모로 사용되므로 그 역수를 취하여 절리군수와 상관성을 검토한 결과는 그림 9와 같다. 여기서 random 절리를 0.5로 가정하였다.

표 10. 절리군수 분류와 Q-system의 Jn과의 대비

grade	description	Q-system(Jn)
I	massive, occasional random joints	1
II	one joint set	2
III	one joint set plus random	3
IV	two joint sets	4
V	two joint sets plus random	6
VI	three joint sets	9
VII	three joint sets plus random	12
VIII	four or more joint sets	15
IX	crush rock, earth-like	20

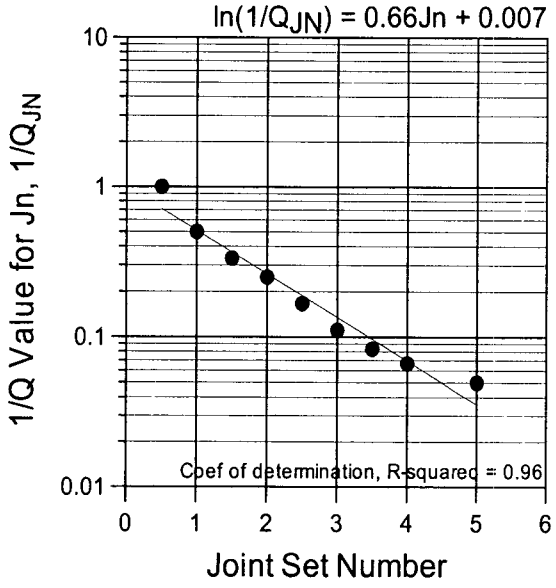

그림 9. 절리군수와 $1/Q_{JN}$의 상관성

⑩ 암괴규모(Block size)

암괴규모는 절리간격, 군수 및 연장성에 의하여 결정되는데 다음 표와 같은 용어로 설명할 수 있으며, 또한, 암괴규모는 암괴규모지수(I_b) 혹은 단위체적 절리수(J_v)로 정량화할 수 있다.

$$I_b = \frac{S1 + S2 + S3}{3} \tag{5}$$

표 11. 암괴규모의 분류와 Jv

description	joints per cubic meter(J_v)
very large blocks	< 1.0
large blocks	1~3
medium size blocks	3~10
small blocks	10~30
very small blocks	> 30

RMR 및 Q-system에서는 암괴규모를 분류인자에 포함하지 않고 있으나 암괴규모는 암반거동의 매우 중요한 지시자이기 때문에 절리간격이나 군수와 별도로 고려할 필요가 있을 지 모른다. 특히, 터널이 경우 터널규모와 암괴의 상대적인 규모에 의하여 록볼트의 길이나 간격 등을 고려할 필요가 있을 지 모른다. 암괴규모 역시 전술한 절리간격이나 연속성과 마찬가지로 구조물과의 상대적인 규모가 분류인자로 사용됨이 타당할 것이다. 이에 대하여 적절한 가중치를 부여하고 정량화하는데 대한 관심도 필요하다.

5. 토의 및 결언

암반의 불연속면이 암반 전체의 거동을 지배하는 경우가 많다는 것은 모든 기술자들이 동의하며 불연속면의 조사방법에 대하여서는 ISRM의 추천안이 널리 인정되며 또한 적용되고 있다. 그러나, 조사된 불연속면에 근거하여 공학적 의미를 가지는 정량적인 암반 특성치를 부여하는데는 많은 어려움이 있다. 그동안 발표된 정량적 의미의 암반분류 안들은 각 저자들의 많은 경험을 바탕으로 터널 등 특정 구조물의 설계나 시공 안정성 평가 시에 적용되어 왔으나, ISRM이 제시한 조사법에 기초하여 국제적으로 기술자 상호간에 사용 가능한 범용암반분류 안이 제시된다면 조사 및 암반분류에 일관성이 있을 것이라 생각된다.

본고에서는 널리 적용되고 있는 기존의 정량적인 암반분류 안인 RMR과 Q-system의 정량적 수치와 ISRM에 제시한 조사 및 기제방법의 대비가능성을 검토하여 보았다. 지질기술자에 의하여 주로 암반불연속면이 ISRM의 방법으로 조사되고 그 결과를 이용하여 설계는 토목기술자가 담당하고 있는 현실에서 두 방법의 적절한 대비는 최적설계와 기술자 상호간의 원활한 의사교류를 위하여 필요한 중간 과정이리라 생각되므로 국내 관련 기술자들의 관심이 요구된다.

참고문헌

1. Attewell, P. B. and Farmer, I. W., 1976, Principles of Engineering Geology. Chapman & Hall, London
2. Baecher, G. B. and Lanney, N. A., 1978, Trace length biases in joint surveys. In Discontinuity

Analysis for Rock Engineering (ed. Priest, S. D.),Chapman & Hall, London
3. Barton, N., R. Lien and J. Lunde, 1974, Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, Rock Mech. 6, pp.183-236
4. Barton N.A. and Choulbey V.,1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, Springer-Verlag, vol.10, no.1, pp.54
5. Bieniawski, Z.T., 1979, The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications, Proc. 4th Int. Congr. Rock Mech., ISRM, Montreux, vol.2 00.41-48.
6. Brown E.T. edit, 1981, Rock Characterization Testing and Monitoring-ISRM Suggested Methods, ISRM, Pergamon Press, pp.6-47.
7. Fookes, p. g. AND Dennes, b., 1969, Observation studies on fissure patterns in cretaceous sediments of south-east England,. Geotechnique, 19, pp.453-477
8. Franklin, J.A., 1976, An Observational Approach to the Section and Control of Rock Tunnel Linings, Proc. Conf. Shotcrete Ground Control, ASCE, Easton, MA., pp.556-596
9. Goodman, R. E., 1976, Methods of geological engineering. West publishing, San Francisco ISRM, 1978, International Society for Rock Mechanics, Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. And Geomecha. Abstr, 15, pp.319-368
10. Kulatilake, P. H. S., Wathugala, D. N. and Stepansson, O., 1990, Three dimensional stochastic joint geometry modeling including a verification : a case study. In Discontinuity Analysis for Rock Engineering (ed. Priest, S. D.), Chapman & Hall, London
11. Piteau, D. R., 1970, Geological factors significant to the stability of slopes cut in rock. In Discontinuity Analysis for Rock Engineering (ed. Priest, S. D.), Chapman & Hall, London
12. Laubsher, D.H., 1977, Geomechanics Classification of Jointed Rock Masses-Mining Application, Trans. Inst. Min. Metall. Sect. A86, pp.A1-A7
13. Priest, S. D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering. Chapman & Hall, London Priest, S. D. and Hudson, J. A., 1981, Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 18, pp.183-197
14. Priest, S. D. and Hudson, J. A., 1976, Discontinuity spacings in the rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 13, pp.135-148
15. Wickham, G.E., H.R. Tiedemann and E.H. Skinner, 1974, Ground Support Prediction Model-RSR Concept, Proc. Rapid Excav. Tunneling Conf., AIME, NY., pp.691-707