

발파와 관련된 암반분류에 대한 고찰

Suggestions for Rock Classification in Blasting

선우 춘, 신 희순, 류 창하

Choon Sunwoo, Hee-Soon Shin and Chang-Ha Ryu

한국지질자원연구원 탐사개발연구부

초 록

터널굴착이나 사면절취 등과 같은 굴착문제에 있어서 굴착방법을 결정하기 위해 대상암반에 대한 리핑암이나 발파암의 구분이 우선되며, 다음에 발파에 의한 굴착방법이 선정되었을지라도 화약량 및 종류, 천공방법 등 발파설계를 위해서 추가적으로 발파암에 대한 세부적인 분류가 필요하다. 일반적으로 RMR이나 Q시스템과 같은 암반분류법이 많이 사용되고 있지만, 발파암에 대한 표준적인 암반분류법이 없으며, 국내에서도 발파암 분류에 대한 연구가 거의 전무한 상태로 발파암의 분류요소로 사용될 수 있는 요소를 구하기 위한 연구가 필요하다. 따라서 이 논문에서는 앞으로 국내에서 발파암 분류연구에 대한 방향제시를 위해서 발파와 암석의 역학적 특성, 지질구조와 불연속면의 특성과의 관계나 굴착과 관련된 암반분류에 대한 여러 논문사례를 통하여 발파암의 분류요소와 분류방법 등에 대해 언급한다.

핵심어 : 암반분류, 발파암, 리핑암, 발파지수, 굴착난이도

1. 서 론

도시화의 확대에 따라 지중개발이 진행됨에 따라 토목, 건축 등과 이에 따르는 지반재해문제 등의 발생으로 연암의 공학적인 분류에 대해서도 관심이 높아지고 있지만, 연암의 문제는 시공에 따르는 굴착문제에 있어서는 발파암과 리핑암의 구분으로 귀착된다. 대상암반에 대한 굴착방법을 결정하기 위해 리핑암이나 발파암의 구분이 우선되며, 발파암 판정으로 인해 발파에 의한 굴착방법이 선정되었을지라도 발파설계를 위해서는 추가적으로 발파암에 대한 세부적인 분류가 필요하다.

국내에서 암반분류는 일반적으로 RMR이나 Q시스템을 주로 많이 사용하고 있으며, 발주처마다 자체의 암반분류 기준을 적용하고 있다. 그러나 표준적인 암반분류법이 없으며, 발파암과 리핑암을 구분하기 위한 기준 정도가 제시되고 있을 뿐이다. 설계표준화를 위한 암반분류에 관한 연구는 많이 이루어지고 있지만 시공과 관련된 암반분류나 발파를 대상으로 하는 암반분류의 연구는 거의 없는 상태이며 발주처에 따라 제시되는 리핑암과 발파암의 구분에 대한 기준이 명확하지 못하기 때문에 현장에서 암판정에 따른 많은 문제가 제기되고 있다. 따라서 발파암의 분류요소로 사용

될 수 있는 요소를 찾기 위한 많은 연구가 필요하기 때문에 이 논문에서는 앞으로 발파암 분류연구에 대한 방향제시를 위해서 여러 논문사례를 통하여 발파암의 분류요소와 분류방법 등에 대해 고찰하려고 한다.

2. 역학적 특성에 따른 분류요소

발파에 의한 굴착에서는 일반적으로 천공, 장약 그리고 발파의 순으로 작업이 이루어지기 때문에 천공과 발파 공정과 관련하여 작업공정마다 관련된 암반분류 요소들을 결정할 수 있다. 천공작업에서 예측이 필요한 항목은 천공작업의 속도를 지배하는 암종, 지질조건 및 암석의 역학적 특성이 파악되어야 한다. 천공속도의 평가를 위한 암반의 분류요소에는 암석의 경도 및 강도, 암석의 구성광물성분, 균열의 빈도 등이 될 수 있다. 또한 천공능력과 관련하여 현장에서 쉽게 측정할 수 있는 Drop hammer test에 의한 Protodyakonov의 계수(Protodyakonov, 1962)도 분류요소로 도입할 수도 있을 것이다.

발파에 있어서는 대상암반에 따른 발파효율의 예측을 위한 요소 중에 가장 일반적으로 사용할 수 있는 것이 발파계수 $C = g \cdot e \cdot d$ (g : 암석계수, e : 폭약의 효력계수, d : 전색계수)이며, 그 중에서도 암석과 관련하여 암석의 발파저항성을 나타내는 암석계수를 이용할 수 있다. 일본의 경우 그림 1처럼 발파암 분류의 요소로 사용한 예가 있으며, 그림 2와 같이 대상암석에서 천공능력과 관계되는 천공속도를 요소로 이용하여 암반분류에 사용한 경우도 있다. 이와 같은 경우에는 설계단계에서 발파암의 판정보다는 시공작업에 따라 수시로 발파암에 대한 판정이 이루어져야 한다.

노천굴착에서의 발파와는 달리 터널굴착에 있어서는 굴착공법에 이용할 수단이 기계굴착

인지 발파에 의한 굴착인지를 결정하기 위한 별도의 기준이 필요하다. 발파굴착과 기계굴착(road header, TBM 등)의 공법 선별분류로서 범용화된 것은 없지만, 일축압축강도가 판단의 기준이 되는 경우는 많이 있다. 그러나 이 분야의 실적들도 매우 적으며, 차후의 중요한 연구과제가 될 수 있을 것이다. 발파에 의한 터널의 굴진에 있어서 암종과 발파방법과의 관련으로서 여러 가지 상관관계가 취해지고 있지만, 그림 3과 같이 굴착 단면적과 천공수와 관계나 장약량(m^3 당)과의 관계를 이용하여 암반등급이 이루어지고 있다.

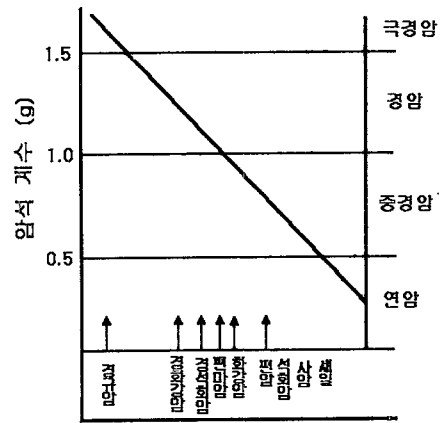


그림 1. 암석계수에 의한 암반분류

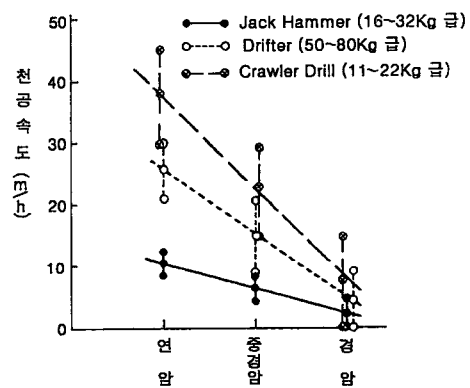


그림 2. 암종과 천공속도의 관계 (발파핸드북, 1976)

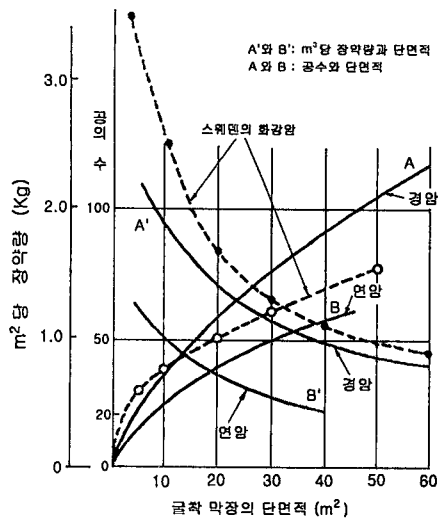


그림 3. 막장면적과 장약량과 공수 (발파핸드북, 1976)

발파에서는 일반적으로 일축 압축강도를 기준으로 구분하며 강도에 따라서 극경암, 경암, 중경암(보통암) 그리고 연암으로 구분하고 있지만, 일축압축강도에 의한 분류도 사용기관과 사용자들에 따라 다르게 여러 가지로 분류되고 있다. 1960년대 이래로 공학자들은 암석강도와 관련하여 다양하게 용어를 정의하기 시작했고, 그림 4처럼 다양한 구분경계를 만들어냄으로써 일관성이 없음을 볼 수 있다.

Coates(1964), Deere & Miller(1966) 그리고 Bieniawski(1973)는 50 MPa이하의 암석을 연암(weak rock)으로, 그리고 25 MPa를 경계로 매우 연약한 암석과 연약한 암석으로 구분하

고 있다. 50~100 MPa 범위의 암석들은 Deere & Miller(1966)와 Bieniawski(1973)에 의해 보통암(medium strength)으로 분류되었으나 영국지질학회 보고서(1970)와 영국 Standard(BS 5930: 1981)에서는 경암(strong)에 속하는 것으로 분류하여 영국과 미국사이에는 차이점을 보이고 있다. 이것은 7.5 MPa와 25 MPa사이 암석을 보통의 강도(medium strength)로 정의한 Broch & Franklin(1972)의 분류와도 상당한 차이를 보이며, ISRM(1981)은 5~25 MPa 사이의 암석을 연암으로 분류하고 있다. 비록 ISRM과 영국지질학회가 50~100 MPa의 암석들을 경암(strong)으로 그리고 100 MPa이상 강도의 암석에 대해 비슷한 정의를 내리고 있지만, ISRM은 50MPa이하 강도의 암석을 보통암(medium strong)으로 정의하고 있고, 영국 지질학회에서는 25~50 MPa사이의 강도를 중간정도의 강도(moderately strong)로 간주하고 있다.

Hawkins(1998)는 공학적 의미에서 100 MPa 이상 강도의 암석에서는 경계구분의 정확성은 별로 의미가 없고, 실제적으로는 공학적 목적상 50 MPa 이하 강도의 암석에 대한 정확한 분류가 특히 중요하며, 그 이유는 실제적으로 이 범주의 암반에서 터널공사가 많이 이루어지고 있기 때문이라고 밝히고 있다. 실제적으로 이 범주에서 발파암과 리핑암이 구분되지기 때문에 발파암의 분류법에서는 이 범주

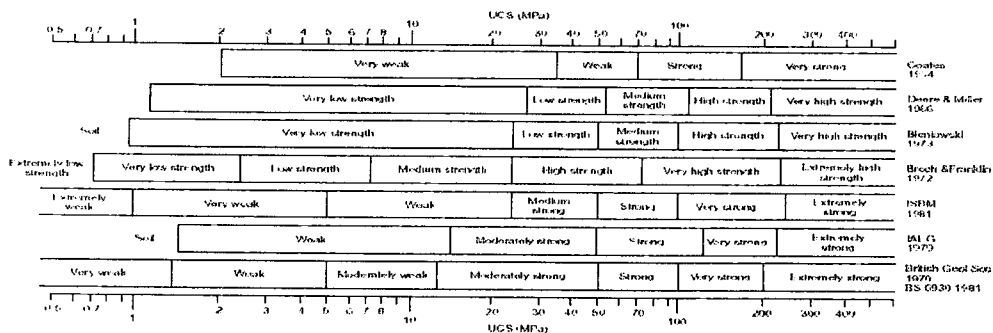


그림 4. 일축압축강도에 의한 신선암의 분류 대비표(Bieniawski, 1989)

의 강도에 대한 연구가 많이 이루어져야 할 것이다.

Singh 외(1993)는 발파와 관련된 암반의 요소를 P파 및 S파 속도, 암석의 밀도, 압축강도, 인장강도, 암석의 impedance 특성, RQD 및 Q 값, 절리의 경사방향 및 경사 그리고 Protodyakonov의 강도 지수 등 10개의 요소를 제시하고 있다. 암석의 밀도는 압축강도와 밀접한 관계가 있으며, 일반적으로 밀도가 낮은 암석은 상대적으로 낮은 에너지에서도 쉽게 변형되고 부서지지만, 보다 치밀한 암석에서는 발파시 좋은 파쇄도와 발파효과를 얻기 위해서는 많은 양의 에너지가 필요하게 된다. 또한 암석의 인장강도와 압축강도는 인장이나 압축의 힘으로 암석을 파괴시키는 데 필요한 힘의 크기를 나타내므로 강도가 클수록 많은 양의 폭약이 필요하게 된다. 즉 같은 수준의 에너지에서는 압축강도가 높은 암반의 파쇄도가 나쁘게 된다.

Hino(1959)는 암석의 압축강도에 대한 인장강도의 비를 나타내는 취성도를 blastability의 지수로 사용하였고, 이 지수 값이 커질수록 파쇄는 더욱 쉬워진다고 했다. Young율과 Poisson비 등의 변형특성은 응력파의 전달과 가스압에 대한 변형에 영향을 준다. 따라서 영율이 크면 가스압에 의한 암반의 압축이나 인장변형을 일으키기가 어렵게 된다. 높은 탄성파속도를 갖는 경암은 폭속이 높은 폭약에 의해 잘 파쇄되는 반면에, 낮은 폭속의 화약은 낮은 탄성파속도를 갖는 암석에 적당하다. 암석의 경도 또한 발파효과에 영향을 미친다. 일반적으로 압축 및 인장강도, 경도, 밀도, 영율, 탄성파속도 등의 물리적 특성은 서로 상관관계가 양호한 특성들이기 때문에 발파암반분류에서는 이와 같은 물리적 특성들을 전체적으로 고려할 필요 없이 시험이 쉬운 대표적인 물성을 분류요소로 취하여 사용하는 것이 바

람직할 수 있다. 따라서 서로 상관성이 높은 물성의 경우는 하나의 요소만을 선정하여 서로의 중복성을 피함으로써 분류법을 간편화시킬 수 있다.

발파에 의해 발생하는 응력파를 감소시키는 암석의 능력을 specific damping capacity (SDC)로 정의되며, 이 SDC 값은 암석의 특성에 따라 변화가 심하며, 암석의 공극율, 투수율, 절리의 수 그리고 수분의 함량이 증가하면 증가되고, 또한 풍화의 정도와 두께에 따라 증가한다. 따라서 이와 같은 요소들도 발파암의 분류요소로서 고려될 수 있다.

3. 지질 및 불연속면에 따른 분류요소

발파효율에 있어서는 암반특성이 화약의 성질보다 중요한 역할을 하며, 이들 암반의 영향 요소들은 앞 절에서 언급된 암석의 물성과 암반의 역학적 특성들로 정량적인 평가는 이루어지지 못하고 있다. 그러나 실제 암석의 역학적 특성보다 암반을 구성하는 구조적 특성이 발파에 더 많은 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다. 예를 들면 발파공을 따라 암층의 변화가 있을 경우 에너지는 연약층을 따라 빠른 변형과 함께 에너지의 손실이 일어나 불량한 파쇄가 일어날 수 있다. 발파에 영향을 미치는 불연속면의 특성들은 불연속면의 분포밀도 즉 불연속면의 간격, 불연속면의 방향성, 불연속면군의 수, 불연속면의 연속성, 충전물이나 간극 그리고 지하수 등을 들 수 있다. 불연속면을 경계로 매질의 성질에 따라 반사 및 굴절이 동시에 발생할 수 있다. 불연속면의 간극 크기에 따라 화약의 에너지 전달에 있어서 차이가 발생할 수 있고, 탄성파가 불연속면에서 반사되거나 감쇠 또는 분산되기도 한다(표 1). 이와 같이 암반 내에 많이 존재하는 불연속면들은 발파효율에 상당한 영향을 미치

표 1. 절리 간극의 크기에 따른 변형율 에너지의 흡수

변형율 에너지의 흡수		절리간극(mm)	절리의 특성
small	< 20 %	0	견고히 접촉되어 있는 절리
		0 ~ 4.0	모암과 비슷한 acoustic impedance의 물질로 충전
slight	20~40 %	~ 0.5	공기나 물로 충전된 개방된 절리
		~ 4.0	모암의 1.5-2배인 acoustic impedance의 물질로 충전
medium	40~80 %	0.5 ~ 1.0	공기나 물로 충전된 개방된 절리
large	> 80 %	0.1 ~ 1.0	이완되거나 다공질의 물질로 충전된 절리
		1.0	공기, 물, 이완되거나 다공질로 충전된 개방된 절리

게 된다.

Holmberg(1973)는 여러 불연속면군을 가지는 변성암시험에서 터널굴착시 효과적인 굴착면을 얻기 위해서는 발파공의 간격을 평균 불연속면 간격으로 천공할 것을 제안하였다. Bhandari(1974)는 불연속면과 발파효과의 연구에서는 비균질 암반이 균질암반보다 충격파의 감쇠와 분산이 더 크고, 불연속면의 틈새와 충전물이 불연속면을 통과한 충격파의 감쇠와 전파속도를 결정하며, 불연속면을 통한 가스의 누기는 발파공 내의 유효압력을 감소시켜 균열의 발전방향을 변화시키고, 발파공에 평행한 큰 불연속면은 균열의 발전을 멈추게 하고, 장약당 파쇄 암석량을 감소시킨다고 밝히고 있다. From(1976)은 불연속면과 같은 연약면과 천공 축과의 사이 각이 0에서 90도로 변함에 따라 파쇄도가 더욱 세립화 된다고 했다.

Lilly(1986)는 발파지수(BI, Blasting Index)를 정의하기 위해서 암반형태(RMD), 절리간격(JPS), 절리방향(JPO), 비중지수(SGI) 그리고 경도(HD)의 5가지 지반특성의 값을 표 2와 같이 요소들에 대한 판정을 구하여 합산하여 다음과 같은 식으로 표시하였다.

$$BI = 0.5 \cdot (RMD + JPS + JPO + SGI + HD)$$

그리고 Powder factor, P_f 는 다음의 식에 의해 구해진다.

$$P_f = 0.004 \times BI \quad (ANFO/kg/t)$$

표 2. 발파지수 요소들의 평점

Geomechanics parameters		Rating
Rock Mass Description (RMD)	powdery/friable	10
	blocky	20
	totally massive	50
Joint Plane Spacing (JPS)	close(<0.1m)	10
	intermediate (0.1-1m)	20
	wide(>1m)	50
Joint Plane Orientation (JPO)	horizontal	10
	dip out of face	20
	strike	30
	dip into face	40
Specific Gravity Influence (SGI)	SGI = 25 · SG - 50 (SG: ton/m ³)	
Hardness (HD)		1-10

Ghose(1988)는 석탄광 노천발파에서 powder factor를 예측하기 위해 밀도, 불연속면의 간격, 접하중 강도지수 및 절리의 방향의 4가지 요소를 사용하여 발파지수를 구하는 암반의 공학적인 분류법을 제안하였다(표 3 참조). 암석물성관련 요소들의 배점을 45점, 불연속면 관련 요소들의 배점을 55점으로 배당하여 불연속면의 영향을 더 비중을 두고 있다. 또한 발파수행조건에 따라 표 4와 같이 보정하여 발파지수를 결정하고, 이 값에 따라 표 5와 같이 Powder factor를 정한다.

표 3. Powder factor예측을 위한 암반분류

요소		값의 범위 및 평점				
암석물성	밀도	1.3-1.6 20	1.6-2.0 15	2.0-2.3 12	2.3-2.5 6	>2.5 4
	점하중 강도지수(MPa)	<1 25	1-2 20	2-4 15	4-6 8	>6 5
불연속면	불연속면의 간격(m)	<0.2 35	0.2-0.4 25	0.4-0.6 20	0.6-2.0 12	>2.0 8
	불연속면방향 (굴진방향과의 관계)	역경사 방향 20	주향이 막장과 예각 15	막장에 수직인 주향 12	경사 방향 10	수평 6

표 4. 보정요소와 보정값

보정요소		보정치
Degree of confinement	Highly confined	-5
	Reasonably free	0
Bench stiffness	Hole depth/burden > 2	0
	Hole depth/burden < 1.5	-5
	Hole depth/burden 1.5-2	-2

표 5. 발파지수와 powder factor의 관계

발파지수	Powder factor (kg/m')
80 ~ 85	0.2 ~ 0.3
60 ~ 70	0.3 ~ 0.5
50 ~ 60	0.5 ~ 0.6
40 ~ 50	0.6 ~ 0.7
30 ~ 40	0.7 ~ 0.8

불연속면의 방향성은 암반구조물의 기하학적 구조와의 상관관계에 따라 발파효율은 상당한 영향을 받는다(표 6). 불연속면이 터널축에 대해 수직인 경우 발파는 일반적으로 좋은 결과를 나타내지만, 불연속면이 터널축과 평행한 경우 굴진이 만족스럽지 못한 경우가 많고, 발파후 막장면이 고르지 못한 경우가 많다. 층리가 터널축과 경사진 경우는 한쪽 측면이 다른 한 측면보다 발파가 잘 이루어진다.

Shukla와 Fourney(1985)는 인공절리를 이용

표 6. 불연속면의 방향성이 발파에 미치는 영향

경사	불연속면의 방향과 발파방향과의 사이각	
0°	발파방향과 무관	
90°	$\beta = 0^\circ = 180^\circ = 360^\circ$	좋은 파쇄도, 규칙적인 막장면
	$\beta = 45^\circ = 135^\circ = 225^\circ = 315^\circ$	다양한 파쇄도, 톱니모양의 막장면
	$\beta = 90^\circ = 270^\circ$	가장 양호한 방향
45°	$\beta = 0^\circ = 180^\circ = 360^\circ$	양호
	$\beta = 45^\circ = 135^\circ$	불량
	$\beta = 90^\circ$	매우 양호는 아님
	$\beta = 225^\circ = 315^\circ$	보통
0~45°	$\beta = 270^\circ$	매우 양호
	$\beta = 0^\circ = 180^\circ = 360^\circ$	양호
	$\beta = 45^\circ = 135^\circ$	불량
	$\beta = 90^\circ$	매우 양호는 아님
45~90°	$\beta = 225^\circ = 315^\circ$	보통
	$\beta = 270^\circ$	매우 양호
	$\beta = 90^\circ$	매우 양호는 아님
	$\beta = 270^\circ$	양호

a) 경사 = 0°

b) 경사 = 90°

c) 경사 = 45°

d) 0° < 경사 < 45°

e) 0° < 경사 < 45°

한 광탄성 실험에 의하면 발파공으로부터의 균열전파는 불연속면의 조건에 따라서 큰 영향을 받는 것을 관찰하였다. 접합이 양호한 불연속면은 발파공으로부터의 균열전파에 큰 영향을 미치지 않으나, 느슨한 불연속면은 균열의 전파를 억제하는 현상을 보이는 것을 관찰하였다. 불연속면의 방향과 자유면 방향과의 관계도 발파효율에 영향을 미친다.

다공질이거나 균열이 발달하여 지하수로 포화되기 쉬운 암반은 발파에 있어서 지하수에 영향을 받는다. 지하수의 존재는 응력파의 전파속도를 증가시키고, 입자들 사이의 마찰력이 감소됨으로써 압축 및 인장강도가 감소되며, 응력파의 감쇠현상이 감소되어 파쇄의 영향이 증가될 수 있고 또한 물이 충전된 절리의 경우는 발파시 내부적인 파쇄가 일어나지 않고 응력파의 전달통로가 될 수 있다. 그러나 암체가 인장영역으로 들어갔을 때는 물이 이동되어 과도한 파쇄를 일으킬 수 있는 썩기를 형성할 수 있다. 이와 같이 발파효율에 영향을 주는 불연속면의 특성들 특히 간격, 틈새, 방향성 그리고 지하수와 같은 요소들은 발파암 분류에서 반드시 언급되어야 할 요소들이다.

4. 굴착과 관련된 암반분류

터널이나 사면의 시공에 따르는 굴착문제에 있어서는 발파암과 리핑암의 구분에 대한 문제로 항상 어려움에 봉착되고 있다. 따라서 발파암분류 이전 단계의 분류방법은 굴착과 관련된 암반평가 문제에 초점을 맞추어 가는 것도 바람직할 것이기 때문에 굴착과 관련되는 암반분류법에 대해 검토하기로 한다. 건설공사에 있어 시공과 관련된 암반분류의 연구는 거의 없는 상태이며, 특히 암반을 대상으로 하는 굴착작업이 많기 때문에 굴착을 위한 암반평가가 시공분야에서 이루어져야 할 과제 중의

하나이다. 아래에 굴착난이도와 관련된 암반평가에 대해 살펴보기로 한다.

4.1 탄성파속도에 의한 굴착난이도

암반굴착의 경우 기계굴착과 발파에 의한 굴착으로 구분하고, 대상지반을 경암, 중경암, 연암 그리고 토사로 구분하여 굴착방법과 대응시키는 것이 일반적이다. 이와 같이 굴착난이도의 판정을 위한 암반분류에서는 여러 요소들의 조합에 의한 복잡한 평가보다는 하나의 분류요소를 사용하여 단순화하려는 경향이 많다. 가장 대표적으로 사용되는 분류요소가 암반의 탄성파속도이다. 암반의 경우에는 암석의 구성물질, 강도, 균열상태 등에 따라 전파속도가 변하며, 이런 특성 때문에 탄성파의 전파속도는 리핑암과 발파암을 판단하는 기준이 되고 있다. 따라서 이런 분류는 노천채굴에서 많이 사용되고 있는 리핑작업에 대한 굴착한계를 탄성파속도 V_p 의 값으로 구분하며, 한 예로 표 7과 같이 rippability guide의 값이 제시되고 있다.

표 7. rippability guide의 값
(Excavation Handbook, 1981)

탄성파속도 기종(Ripper) (지반)	V_p (m/sec)					발파굴착
	500	1,000	1,500	2,000	2,500	
중형 Ripper 27 - 45 톤급 (200 - 300 Hp)	리핑 불발파	용이	보통	경암	중 경 암 또는 암암	발파굴착
대형 Ripper 45 - 72 톤급 (300 - 525 Hp)	리핑 불발파	용이	보통	경암	중 경 암 또는 암암	발파굴착

탄성파속도 450m/sec를 토사와 리핑작업의 경계로 정하고, 리핑가능 한계를 1,500~2,000m/sec(굴착기종에 따라 차이가 있음)로 하여 발파암과 리핑암을 구분시키고 있다. 이와 같이 암반굴착의 난이도에 관한 요소를 탄성파속도라는 물리량 하나의 요소에 집약하여 매우 단순화된 분류방법이 된다. 그러나 하나의 요소로 집약하여 단순화시킴으로서 작업의

간편성이라는 장점도 있지만 또한 지질상황에 따라서는 많은 오차가 만들 수 있는 암반분류법이 된다. 지반의 탄성파전파속도와 리퍼의 굴착한계의 관계는 다수의 기관에 의해 소개되고 있지만, 그 한 예가 그림 5로서 미국의 caterpillar사의 에 굴착한계를 나타낸 것이다.

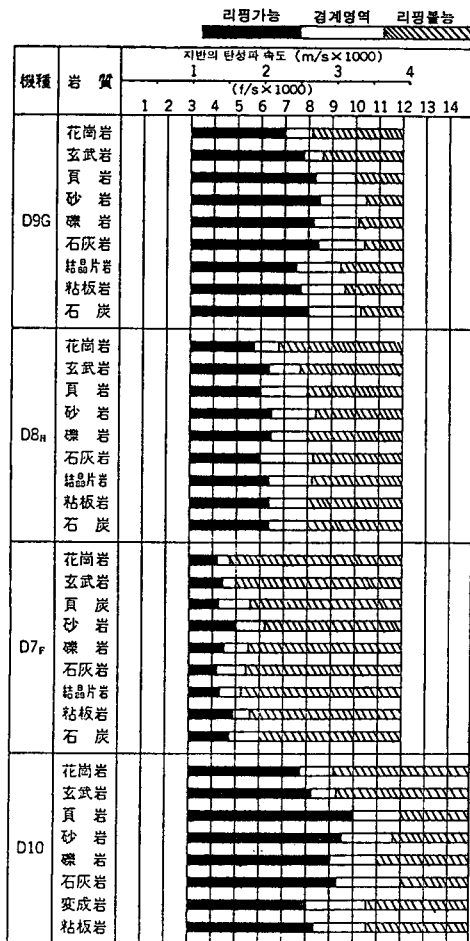


그림 5. 리퍼의 작업가능 한계도 (Caterpillar사)

현지암반의 탄성파속도는 암석강도와 관련되는 암석의 자체속도뿐 만 아니라 불연속면의 빈도에 영향을 받고 있으므로 현장암반을 대상으로 하는 탄성파속도의 측정은 굴착한이도의 경계를 규명하는 효과적인 방법이 될 수

있다. 리핑암 및 발파암의 구분은 불연속면의 분포와 관련 있는 TCR과 RQD와 요소들을 사용하여 구분할 수도 있다.

Broadbent(1974)는 탄성파속도가 증가함에 따라 만족스러운 파쇄도를 얻기 위해서는 보다 큰 에너지가 요구되기 때문에 발파설계에 탄성파속도를 적용하여, 암반의 탄성파속도에 따라 powder factor를 결정하였다(그림 6). 이러한 방법을 적용함으로써 발파단가를 15%까지 절감하였음을 보고하고 있다.

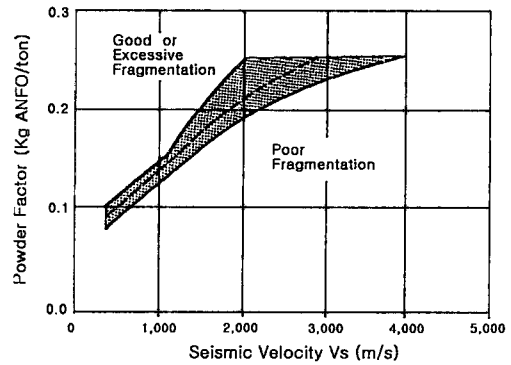


그림 6. 탄성파 속도와 powder factor와의 상관관계

4.2 균열계수와 탄성파속도에 의한 굴착난이도

탄성파속도 한 요소에 의한 판정오차를 줄이고, 분류기준의 신뢰도를 높이기 위해 일본 도로공단의 경우는 탄성파속도 외에 압축강도의 요소를 첨가해 이 두 요소를 이용한 균열계수의 개념을 만들어 암반구분을 실시하고 있다. 이 분류법은 시험암편의 일축압축강도, 시험암편의 탄성파속도 및 굴착할 현지암반의 탄성파전파속도라는 3개의 요소를 사용하여 균열계수와 관련지어 경암, 연암 및 토사로 구분하고 있다(그림 7).

탄성파는 일반적으로 고결도가 높은 암석에서는 전파속도가 빠르지만, 균열이 많은 암반에서는 속도가 늦어진다. Ikeda(1969)는 암석의

균열정도를 알기 위한 균열계수를 제안하였고, 이 계수는 현장의 탄성파속도와 동일 현장에서 측정한 균열이 없는 암석시험편의 탄성파전파속도를 측정하여 다음 식으로 구한다.

$$C_r = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2$$

여기서,

V_1 : 암석시험편의 탄성파전파속도

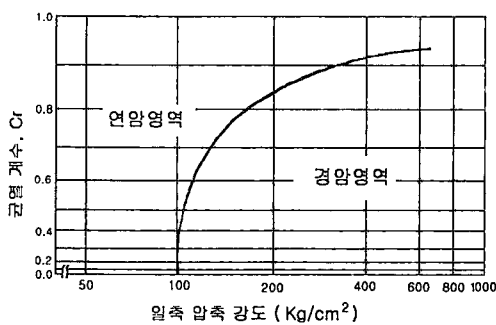
V_2 : 지반의 탄성파속도

균열이 적으면 $V_1 \approx V_2$ 가 되어 C_r 은 1.0에 가까워지고, 반대로 균열이 많으면 V_2 가 V_1 에 비하여 작기 때문에 C_r 은 0에 접근한다. 이 방법에 의하면 이암과 같은 균열이 없는 암석에서도 일축압축강도가 100kg/cm² 이하이고, V_p 가 2,000m/초 이하가 되어 연암으로 기계굴착의 대상이 되고 있다. 그리고 일축압축강도가 300 kg/cm² 이상이고, V_p 가 3,000m/sec 라도 균열계수가 0.9이상이면 기계굴착이 가능한 것으로 표시되고 있다. 따라서 이 방법은 절4.1의 rippability guide 값과 비교하면 암반 굴착가능성의 판단기준에 대한 정도가 향상되는 것을 알 수 있다.

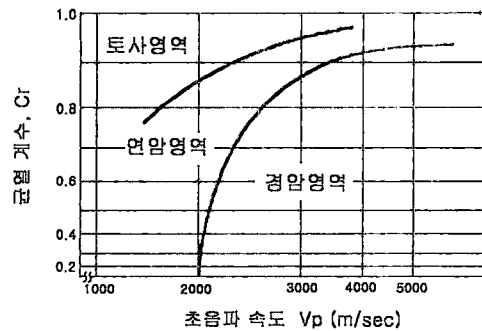
4.3 절리간격과 강도에 의한 굴착난이도

Franklin의(1972)는 암석의 강도를 근거로 굴착방법의 분류법을 제안하였다. 이 분류기준은 굴착대상 암반내의 절리간격과 현장에서 쉽게 측정할 수 있는 Schmidt hammer 시험 또는 점하중 시험에 의한 일축압축강도를 이용하는 분류방법이다. 절리간격과 강도의 관계에 따라 암반을 인력굴착이 가능한 암반, 기계굴착이 가능한 암반, 발파에 의해 이완되는 또는 균열이 발생하는 암반으로 분류하고 있다(그림 8). 그림 8.a는 불연속면의 간격과 암석의 강도사이의 관계를 그리고 그림 8.b는 강도와 암질(rock quality)사이의 관계를 도식한 것이다. 여기서 같은 강도의 암반이라도 절리간격에 따라서 인력굴착에서 발파에 의한 굴착까지 굴착방법이 바뀔 수 있음을 알 수 있다.

또한 Weaver(1975)는 Rippability를 평가하기 위해 표 8과 같이 탄성파 속도, 암석경도, 풍화정도, 불연속면의 상태(간격, 연속성, 간극 및 방향성) 등 7가지 요소에 따른 분류등급표를 제시하였는데, 여기에서도 불연속면의 간격과 탄성파속도가 전체 평점의 56%로 가장 많은 비중을 차지하고 있다.



a) 균열계수와 일축압축강도



b) 균열계수와 탄성파전파속도

그림 7. 균열계수와 암석시험편의 일축압축강도 및 탄성파전파속도에 의한 구분 (일본지반공학회 '암석의 공학적성질과 설계시공에의 응용',)

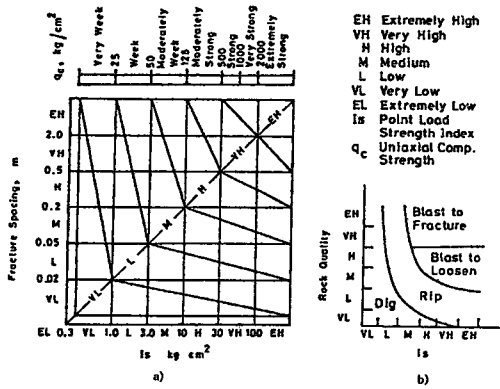


그림 8. 균열간격 및 강도에 의한 굴착난이도결정 (Franklin and Broch, 1972)

흙-암석의 경계에서는 많은 혼선이 있지만, ISO는 흙은 0.6MPa이하의 물질로서 정의하고 있다. rippability의 평가는 굴착의 관점에서 이루어지며, 강한 암석일지라도 간격이 좁은 절리나 층리를 갖는 퇴적암들은 중장비의 ripper에 의해 제거될 수 있다. 퇴적암이 일반적으로

쉽게 리핑이 되지만, 편마암, 규암, 판암과 점판암과 같은 변성암은 편리의 정도나 운모의 양에 좌우되고, 화성암은 리핑이 쉽지 않다.

4.4 육안에 의한 굴착난이도

세일, 점판암, 편암 등과 같이 얇은 층리나 편리가 발달하는 퇴적암이나 변성암들은 리핑이 보다 쉽고, 사암, 화강암, 안산암, 현무암 등 불연속면이 잘 발달되어 있지 않은 괴상암들은 리핑이 곤란하다. 리핑암과 발파암의 한계치는 일정하지 않지만, 이 한계치 이하에서도 세립자에 의해 고결된 암석이나 절리·균열 등과 같은 불연속면이 발달하지 않는 암반들은 불연속면이 발달한 암석보다는 리핑이 곤란해진다. 암반의 육안관찰에 의해 균열, 층리 및 절리와 같은 불연속면의 유무 및 크기, 풍화상태 그리고 햄머 타격으로부터 굴착난이도를 판단하는 기준은 표 9와 같다.

표 8. Rippability 등급분류표 (Weaver, 1975)

암반 등급	I	II	III	IV	V	
	극경암	경암	보통암	연암	풍화암	
탄성파속도 (m/s)	>2,150 26	1,850~2,150 24	1,500~1,850 20	1,200~1,500 12	450~1,200 5	
암석경도	극히 굳음 10	매우 굳음 5	굳음 2	연약 1	매우 연약 0	
풍화정도	풍화안됨 9	약간 풍화 7	풍화 5	심한 풍화 3	완전 풍화 1	
절리 간격 (mm)	>3,000 30	1,000~3,000 25	300~1,000 20	50~300 10	<50 5	
절리연속성	비연속성 5	약간의 연속성 5	연속성 충전물 없음 3	연속성 약간의 충전물 0	연속성 충전물 0	
절리 간극	간극 없음 5	약간의 간극 5	간극 <1mm 4	충전물 <5mm 3	충전물 >5mm 1	
주향과 경사 ¹⁾	매우 불량 15	불량 13	보통 10	양호 5	매우 양호 3	
총 점수	90~100	70~90	50~70	25~50	<25	
굴착난이도평가	발파	ripping매우곤란/발파	ripping 곤란	ripping 보통	ripping 용이	
Tractor 선택	마력	-	770/385	385/270	270/180	180
	Kw	-	575/290	290/200	200/135	135

주) 1. 주향과 경사방향에 따라 Rippability 평가는 달라진다.

2. 75이상의 점수는 사전발파(pre-blasting)없이 굴착할 수 없는 것으로 간주.

4.5 기타

Singh 외(1987)는 인장압열시험 또는 점하중지수로부터 정의되는 암석의 인장강도, 육안 관찰에 의한 풍화정도, 지표나 cross-hole 탐사에 의해 결정되는 탄성과 속도, Cherchar index 값과 Singh 외(1986)에 의해 주어지는 물리적 및 광물학적 성질의 시험에 근거한 마모지수(abrassiveness index) 분류에 의한 암석의 마모도, scanline 조사에 의해 측정되는

불연속면의 간격 등의 5가지 요소들의 혼합된 효과를 근거로 RIC(Rippability Index Classification)를 표 10처럼 제안하였다. 이 index는 굴착난이도와 관련된 암석의 성질을 나타내는 데 사용하였다.

Kirsten(1982, 1988)은 탄성과속도는 일반적으로 암반의 굴착난이도와 상관성이 빈약하고, 탄성과속도의 측정오차가 크기 때문에 암반의 전체 특성을 표현하기는 곤란하다고 언

표 9. 육안관찰 또는 시험 햄머에 의한 굴착난이도의 판단

육안관찰·햄머	암종의 특징	판정
누가 보아도 풍화암으로 볼 수 있는 것 균열면에 수목의 모근을 볼 수 있는 것	-풍화작용을 받아 변질되어 있다. -황갈색 내지 갈색을 띠고, 현저하게 연질이다. -암반에 큰 개구 균열 또는 절리가 발달하고, 이것에 의해 암반은 각 개의 암괴로 분리되어 있다. -나무뿌리가 암반의 절리 또는 균열면에 침입하여 있다.	리핑 가능
햄머로 가볍게 타격하면 절리 또는 균열을 따라 분리된다	-암종은 상당히 견고할지라도 풍화작용 때문에 연화된 경향을 볼 수 있다. -1~2mm의 간극을 가지는 많은 절리 또는 균열들이 발달하고 있다.	리핑이 가능한 경우도 있다. 사전발파로 암반을 이완시킨 후 리핑
햄머로 강타해도 깨어지지 않는다.	균열·절리는 잘 밀착되어 있고, 이 면을 따라 풍화의 흔적을 볼 수 없다.	리핑불가능 발파에 의해서만 가능

표 10 RIC(Rippability Index Classification; Singh 외, 1987)

요소	등급 1	등급 2	등급 3	등급 4	등급 5
인장강도(MPa)	< 2	2-6	6-10	10-15	>15
평 점	0-3	3-7	7-11	11-14	14-17
풍화 상태	완전풍화	심한풍화	보통풍화	약간풍화	풍화안됨
평 점	0-2	2-6	6-10	10-14	14-18
탄성과속도(m/s)	400-1100	1100-1600	1600-1900	1900-2500	>2500
평 점	0-6	6-10	10-14	14-18	18-25
마모도	매우 낮음	낮음	보통	높음	매우 높음
평 점	0-5	5-9	9-13	13-18	18-22
불연속면 간격(m)	<0.06	0.06-0.3	0.3-1	1-2	>2
평 점	0-7	7-15	15-22	22-28	28-33
총 평점	< 30	30-50	50-70	70-90	>90
굴착난이도	용이	보통	어렵다	한계	발파
추천 dozer	경량급	중(中)량급	중(重)량급	초중량급	

급하고 있다. 암반 리핑의 효율성은 주로 암석의 강도, 절리의 강도, 암석블록의 크기 및 모양 그리고 암석블록과 리핑방향과의 상대적인 방향으로 간주하고, 이 요소들을 굴착난이도와 관련하여 정량적으로 표시할 수 있는 암반분류법을 개발하였다. 이 분류법은 자연암반을 excavatability index N으로 표시하며 다음과 같은 식으로 정의하였다. 이 N 값에 따른 굴착난이도의 판정 등급은 표 11과 같다.

$$N = M_s \cdot \frac{RQD}{J_n} \cdot J_s \cdot \frac{J_r}{J_a}$$

여기서,

M_s : 암반강도정수(MPa), 건조하고, 절리가 없고, 등방성의 암반에 대한 것으로 여기서는 대략적으로 암석의 일축압축강도를 나타낸다.

J_n, J_r, J_a : Q시스템의 절리군의 수, 거칠기 계수, 풍화 및 변질 계수와 동일

J_s : 상대적인 지반구조 정수로 개개의 블록과 리핑방향과의 상대적인 방향으로 무결암의 경우는 $J_s=1.0$ 이 된다.

표 11. excavatability index N 값에 따른 굴착방법 (Kirsten, 1982, 1988)

N 값	채굴 방법
$1 < N < 10$	리핑 용이
$10 < N < 100$	리핑 곤란
$100 < N < 1,000$	리핑 매우곤란
$1,000 < N < 10,000$	리핑 거의 불가능/ 발파
$N > 10,000$	발파

Abdullatif와 Cruden(1983)은 영국의 23개 site에서 석회석, 사암, 세일 그리고 화성암을 대상으로 3종류의 암반분류법 즉 Franklin(1974)의 분류방법, RMR과 Q시스템을 이용하여 시험 비교한 결과에서 RMR시스템이 채굴방법의 선정과 관련하여 가장 좋은 결과를 얻

어 표 12와 같은 guide line을 제시하였다.

표 12. RMR 값에 따른 굴착방법 (Abdullatif & Cruden, 1983)

RMR 값	채굴 방법
< 30	인력 굴착
31-60	리 핑
61-100	발 파

또한 Q값과의 관계에서는 인력굴착이 가능한 0.14 이하의 Q값과 리핑이 요구되는 1.05 이상의 Q값 사이에는 격차가 있음을 언급했고, 또한 3.2와 5.2사이의 Q값에서는 리핑이 요구되는 암반과 발파가 요구되는 암반이 상존하여 중복되고 있음을 밝히고 있다. Q시스템이 암석의 굴착성을 나타내는 지표로서 문제가 있는 이유는 터널에서는 중요한 실제응력요소인 J_w/SRF 가 노천채굴에서는 영향을 주지 않기 때문이라고 언급하고 있다.

Franklin(1993)은 멕시코의 수력발전소 터널의 연구에서 적정 발파설계를 위한 시험적인 방법을 적용하였다. 92개의 터널축정 구역을 기초로 Q시스템의 값과 파쇄와의 관계를 밝힌 결과에 의하면 파쇄와 Q 값이 역비례하고 있음을 제시하고 있다(그림 9.a). 주어진 Q 값에서는 파쇄는 주변 관련공의 powder factor(PPF, perimeter powder factor)에 비례하여 증가함을 보이고 있다(그림 9.b). 여기서 PPF는 관련 발파공내의 화약량을 제거된 암석의 체적(perimeter 길이 x 발파공 심도 x 최소 저항선)으로 나눈 것이다.

Chakraborty 외(1997)는 평균 powder factor Pf(사용된 화약량을 파쇄된 암석의 체적으로 나눈 값)와 가중치 평균 Q값과 사이에는 다음의 관계가 있음을 밝히고 있다.

$$P_f = 1.02 + 0.0005 Q \quad \text{kg/m}^3$$

$$r^2 = 0.820$$

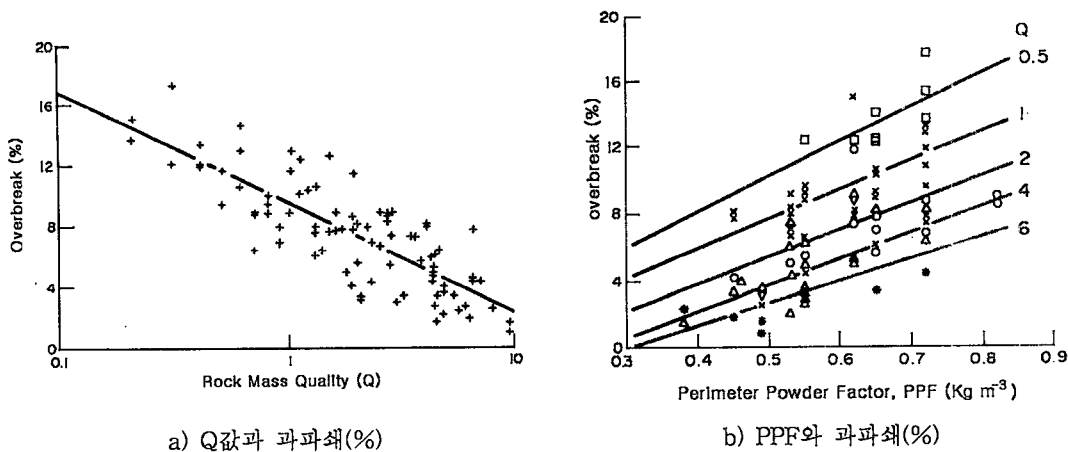


그림 9. 과파쇄와 Q값 및 PPF와 관계(Franklin, 1993)

이와 같이 powder factor와 Q값의 상관관계를 통하여 Q분류법을 powder factor를 구하는 발파암 분류법의 하나의 지수로서 이용하고 있음을 볼 수 있다.

Innaurato 외(1998)는 RMR과 η (한 발파당 이론적인 굴진길이에 대한 실제 굴진 길이의 비)과의 상관관계에 대한 연구에서 RMR과 η 은 서로 역비례하는 경향(RMR값이 높은 경암은 RMR값이 낮은 연암보다 발파가 곤란)은 보이지만 서로의 상관관계는 매우 분산되고 있음을 제시하고 있다.

현장에서 누두공 시험에 의한 누두지수에 의한 발파암분류를 시도할 수도 있을 것이다. 이런 경우는 노두가 노출되어 있거나 절토가 된 암반에서는 사용이 가능하지만, 조사 및 설계단계에서 노두가 없는 경우는 보편적인 방법이 될 수 없다. 또한 발파에 따른 안전문제도 고려해야 하는 단점도 있을 수 있다.

5. 결론

발파암의 분류에서는 우선 2단계의 분류작업이 필요하다. 발파암과 리핑암의 구분이 필요하며, 발파암 판정 시에는 천공과 관련된 암

반분류와 발파패턴을 결정하기 위한 발파암의 세부적인 분류가 필요하지만 너무 세부화되는 것은 작업현장에서 혼란을 초래할 수 있기 때문에 천공과 발파는 분리하지 않는 것도 바람직하다고 본다. 발파암의 분류법에 사용할 수 있는 분류요소로서는 발파와 가장 관련된 물성을 파악하는 것이 가장 중요하지만 현재까지는 어느 한 물성이 발파와 관련되는 지에 대해 뚜렷하게 밝혀진 것이 없고 복합적인 요소에 의해 파괴가 이루어지기 때문에 여러 요소에 의해 암판정이 이루어져야 할 것이다.

여러 물성 중에서 강도와 탄성파속도가 대표적인 요소가 될 수 있으며, 불연속면의 특성 중에 발파효율에 영향을 주는 불연속면의 특성인 간격, 틈새, 방향성 그리고 지하수와 같은 요소들은 발파암분류에서 반드시 언급되어야 할 요소들이다. 또한 일반적으로 압축 및 인장강도, 경도, 밀도, 영율, 탄성파속도 등의 물리적 특성은 서로 상관관계가 양호한 특성들이기 때문에 발파암반분류에서는 이와 같은 물리적 특성들을 전체적으로 고려할 필요 없이 시험이 쉬운 대표적인 물성을 분류요소로 취하여 사용하는 것이 바람직할 수 있다. 발파에 의해 발생하는 응력파를 감쇠시키는 암석

의 능력을 specific damping capacity(SDC)값도 암석의 특성에 따라 변화가 심하기 때문에 발파암의 분류요소로서 고려될 수 있을 것이다. 따라서 서로 상관성이 높은 물성의 경우는 하나의 요소만을 분류요소로 선정하여 서로의 중복성을 피함으로써 분류법을 간편화시킬 수 있을 것이다. 물리량 하나의 요소로 집약하여 단순화시킴으로서 작업의 간편성이라는 장점도 있지만 또한 지질상황에 따라서는 많은 오차가 만들 수 있는 암반분류법이 된다.

현장에서 설계초기 조사에서 이루어지는 RMR과 Q 분류법과 연계되는 발파암 분류법을 개발하는 것이 작업의 중복성을 피하는 면에서는 좋을 것이다. 그렇지만 이러한 분류법과 발파효율과의 상관성을 구하기 힘들면 발파에 영향을 주는 암반특성을 중심으로 하는 요소들로 재구성하여 새로운 분류법을 개발할 수 있지만 영향요소들의 선택이나 요소들간의 가중치배분에 있어서는 많은 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- 發破ハンドブック, 1976, 山海堂.
- Bhandari, S, 1974, Blasting in non-homogeneous rocks, Australian Mining Engineering Department, Queens University, Kingston, Ontario.
- Bieniawski Z.T., 1973, Engineering classification of jointed rock masses. Trans S Afr. Inst. Civ. Eng. vol. 15, pp335~344.
- Bieniawski Z.T., 1974, Estimating the strength of rock materials. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. vol. 74, 312~320.
- Bieniawski Z.T., 1989, Engineering rock mass classifications, Wiley, New York, 251p.
- British Standard Institution, 1981, Code of practice for site investigations, BS 5930, HMSO, London.
- Broch E.M. & Franklin J.A., 1972, The point load strength test, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol. 9, pp669~697.
- Brown E.T., Richards L.R. & Barr M.V., 1977, Shear strength characteristics of the Delabole Slates, In: Procd Conf. Rock Engineering Newcastle upon Tyne, pp35~51.
- Chakraborty A.K., Jethwa J.L. and Dhar B.B., 1997, predicting powder factor in mixed face condition: development of a correlation based on investigation in a tunnel through basaltic flows, Eng. Geol., vol. 47, pp31-41.
- Coates D.F., 1964, Classification of rock for rock mechanics, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol. 1, pp421~429.
- Colback P.S.B. & Wiid B.L., 1965, The influence of moisture content on the compressive strength of rock, In: Procd Symp. Rock Mech. Canadian Dept. Min. Tech. Survey, Ottawa, pp65~83.
- Deere D.U. & Miller R.P., 1966, Engineering classification and index properties of intact rock, Air Force Lab. Tech. Rep AFNLTR-65, 116, Albuquerque NM.
- Franklin J.A., 1974, Rock Quality in relation to the quarrying and performance of rock construction materials, Proc. 2nd Int. Cong. Int. Assoc. Eng. Geol., Paper IV-PC-2, pp.11.
- Franklin J.A., Broch E. and Walton G., 1972, Logging the mechanical character of rock, Trans. Inst. Mining Metallurgy, A80, A1-A9 and discussion A81, A34, A51.
- From, T, 1976, Model scale blast experiments in jointed materials, Swedish

Detonic Research Foundation, Report DS 1976, 11.

Ghose, A.K. and N.M. Raju, 1981, Characterization of rock mass vis-à-vis application of rock bolting in India coal measure, Proc. 22nd U.S. Symp. Rock Mech., MIT, Cambridge, MA, pp.422~427.

Ghose, S.A., 1988, Designs of drilling and blasting subsystems - A rock mass classification approach, Mine planning and equipment selection, Balkema.

Hawkins A.B., 1998, Aspects of rock strength, Bull. Eng. Geol. Env., vol. 57, pp17~30.

Hino, K, 1959, Theory and practice of blasting, Nippon Kayaku Co. Ltd.

Hoek E. & Brown E.T., 1980, Underground excavations in rock, Inst. Min. Metall., London.

Hoek E, Brown ET, 1997, Practical estimates of rock mass strength. Int J Rock Mech. Min. Sci. vol. 34, pp1165-1186.

Hudson J.A., 1989, Rock mechanics principles in engineering practice, CIRIA Ground Engineering Report: Underground Construction, Butterworths, Oxford.

Innaurato, N., R. Mancini & M. Cardu, 1988, On the influence of rock mass quality on the quality of blasting work in tunnel driving, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.13, No.1, pp.81-89.

Kirsten, H.A.D., 1982, A classification for excavation in natural materials.", Civ. Eng. S. Afr., pp.293-307.

Kirsten, H.A.D., 1982, Proc. Symp. Rock class eng. purpose, ASTM, Special technical publication 984, pp.102-120.

IAEG. 1979, Report of the commission on engineering geological mapping, Bul. IAEG, vol. 19, pp364~371.

Iliev, I.G., 1966, An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties, Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon, pp 109~114.

ISRM, 1981, Brown E.T.(ed), Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. Pergamon Press.

Kendorski, F.S., Cummings, R.A., Bieniawski, Z.T. & Skinner, E.H., 1977, Rock mass classification for block caving mine drift support, Proc. 15th Int. Cong. Rock Mech. ISRM, ppB101~113.

Lilly, P.A., 1986, An empirical method of assessing rock mass blastability, Julius Kruttschnitt Mineral Research Center.

Olivier, H.J., 1976, Importance of rock durability in the engineering classification of Karoo rock masses for tunneling. In Z.T. Bieniawski(ed.), Exploration for rock engineering, Balkema, Rotterdam, vol.1, pp.137~144.

Protodyakonov M.M., 1962, Mechanical properties and drillability of rocks, Proceedings Symp. on Rock Mechanics, Univ. of Minn..

Romana R.M., 1985, New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes, Proc. Int. Symp. on the role of rock mechanics, Zactecas, pp.49~53.

Serafim, J.L. & Pereira, J.P., 1983, Considerations on geomechanics classification of Bieniawski, Proc. Int. Symp. on Eng.

Geol. and Underg. Constr. LNFC. Lisboa. vol 1, pp.II 31~II 42.

Shukla, A. and W.L. Fournery, 1985, Explosively driven crack propagation across an interface, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., V. 22, No.6, pp. 443~451.

Singh, B. & P. Pal Roy et al., 1993, Blasting in ground excavation and mines, A.A.Balkema, 117p.

Unal, E., 1983, Design guidelines and roof control standards for coal mine roofs, Ph.D thesis, Pennsylvania State University, University Park, 355p.

Weaver, J.M., 1975, Geological factors significant in the assessment of rippability, Civ. Eng. S. Afr. 17, pp 313~316.

Wickham, G.E., H.R. Tiedemann and E.H. Skinner, 1972, Support determination based on geologic prediction, Proc. Rapid Excav. Tunneling Conf., AIME, New York, pp.312~320.