

석회석 광산에서의 GSI 분류법에 의한 암반특성연구

선우춘^{1)*}, Karanam U. M. Rao²⁾, 정소걸¹⁾, 전양수¹⁾

A Study on the Characteristics of Rock Mass by GSI in Limestone Mine

Choon Sunwoo, Karanam U. M. Rao, So-Keul Chung and Yang-Soo Jeon

Abstract Rock mass classification methods such as RMR, Q system and GSI have been widely adopted with certain modifications for the design of mine openings. The GSI system is the only rock mass classification system that is related to Mohr-Coulomb and Hoek-Brown strength parameters and gives a simple method to calculate the engineering properties of rock masses which can be useful input parameters for a numerical analysis. A detailed surveying for GSI mapping as well as for calculating RMR values was undertaken at Daesung and Pyunghae underground limestone mining sites. RQD values were determined for four locations in these two mining sites. Based on GSI values and intact rock strength properties, the rock mass strength, modulus of elasticity as well as the Mohr-Coulomb strength parameter c_m and ϕ_m were determined. GSI and RMR are correlated.

KeyWords Rock mass classification, GSI, RMR, Q, Rock mass strength and deformation modulus, Modulus ratio

초록 GSI, RMR, Q와 같은 암반분류법들을 광산 개도설계에 적용하기 위해서 수정을 통하여 사용하고 있다. GSI시스템은 Mohr-Coulomb과 Hoek-Brown 강도와 관련된 유일한 암반분류법이며 수치해석을 위한 입력자료로 사용될 수 있는 암반의 공학적 성질을 계산할 수 있는 간단한 방법을 제공하는 암반분류법이다. RMR값의 측정 뿐만 아니라 GSI에 대한 상세한 조사가 대성광업 천천광업소와 한국공항의 평해석회석 광산에서 수행되었다. 그리고 RMR과 Q시스템의 문제점에 대해서도 언급하였고, GSI를 근거로 하여 신선암의 강도, 암반의 강도, 탄성 계수와 실험실의 Mohr-Coulomb의 강도상수인 c_m 과 ϕ_m 을 결정하였다. 그리고 GSI와 RMR의 상관관계에 대해서도 조사하였다.

핵심어 암반분류, GSI, RMR, 암반강도, 암반변형계수, 변형계수비

1. 서 론

1.1 개요

광산에서의 채광은 불균질하며 불연속체인 암반에서의 수많은 공동개설이 필수 불가결하다. 그러므로 실질적으로는 지하공동의 안정성은 절리가 발달하는 암반의 강도뿐 만아니라 표면의 거칠기, 풍화정도, 충전물 그리고 지하수 상태와 같은 절리의 특성에 의해 좌우되며, 이것은 암반의 강도뿐 만아니라 암반의 변형계수에도 영향을 준다. Lama와 Vutukuri(1978)는 암반의 공학적 성질은 암반자체의 강도보다도 암반내에 존재하는 지질적인 불연속면들에 의해 더 좌우된다고 발표한

적이 있다. Kirkaldie(1988)는 암반의 안정성이나 변형 및 강도에 영향을 주는 요소에는 28개가 있다고 했다. 절리암반의 일반적인 역학적 성질을 결정하는 것은 매우 어려운 작업이며, 현장에서 대규모의 시험이 필요하고 매우 많은 비용이 소모되기 때문에 몇 개의 대표적인 요소들에 근거를 두는 간단한 암반평가 시스템의 개발이 필요하다. Hoek et al(1995)에 의해 제안된 GSI(Geological Strength Index)나 Palmström(1996)에 의한 RMi(Rock Mass index)는 신선암의 특성을 사용하여 현지 암반의 강도를 추정하거나 결정하기 위해 사용할 수 있는 암반분류법들이다. 실제 공학적으로 현장에서 많이 사용되고 있는 RMR, Q 그리고 GSI와 같은 암반분류법들은 약간의 수정을 통하여 광산에서 적용되어 오고 있다. RMR 분류법은 Laubscher(1986)에 의해 광산의 설계에 사용되었고, Kendorski(1983)에 의해 봉락채광에 사용되었다. Q는 Potvin(1988)에 의해 수정되어 채광설계에 사용되었다. 여

¹⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부

²⁾ 한국지질자원연구원 Post-doctoral fellow

*교신저자(Corresponding Author): sunwoo@kigam.re.kr

접수일: 2004년 3월 4일

심사 완료일: 2004년 4월 14일

기서는 현지암반의 암축강도와 변형계수를 여러 방법에 의해 계산하는 것을 시도하였고, 계수비를 사용하여 암반분류법간의 신뢰도를 비교하였다. GSI 분류법의 근본적인 장점중의 하나는 수치해석에 필수적인 암반의 강도와 변형계수를 결정하는 데 쉬운 수단을 제공한다는 것이다.

1.2 조사광산 현황

석회석 채광에서 지하채굴의 증가와 함께 지하갱도 및 채광장의 안정성 문제가 대두되고 있어, 지하채굴 석회석 광산에서 갱도의 안전성 판단과 갱도크기의 적정성을 검토하기 위한 목적으로 암반분류법의 적용에 대한 연구가 이루어 졌다. 지하갱도의 안정성은 공동주변 암반의 강도, 갱도의 크기, 초기응력 및 유도응력의 크기에 좌우된다. 현재 특히 광산조건에 적합한 지반제어책을 결정할 수 있는 일반적인 방법이 없기 때문에 광산의 특수한 상황에 따라 그 해결방법이 결정되고 있다. 지하채광의 설계에서 부딪히는 여러 형태의 불확실성에 대한 문제의 해결책으로 여전히 암반분류법이 많이 사용되고 있다. 이러한 해결책을 모색하기 위해서 수압파쇄시험을 포함한 시추조사와 상세한 현장 암반조사가 제천의 대성광업 제천광업소(이하 대성광산이라 칭함)와 울진에 소재하는 한국공항의 평해광업소(이하 평해광산이라 칭함)에서 이루어 졌다.

대성광산의 조사대상 지역에 분포하는 광체의 형상은 향사구조를 가지는 가장산향사이며, 갑산층의 중부석회석을 대상으로 개발하고 있다. 대체적으로 광체모양은 주향이 N25~30W이고, 경사는 65SW 내지 수직과 65NE 내지 수직인 향사모양으로, 광체의 폭은 30m에서 80m 정도이다. 대성광산의 주개발 갱도는 410갱도로 주운반갱도이고(C), 1중단(B), 2중단(A), 하1단(D)과 하2단이 개설되어 있다(Fig. 1). 운반갱도는 개입구에서 N30E 방향으로 360m 지점에서 갑산층내 중부석회암(고품위광체)를 착백하여 서측 날개부 광체의 주향방향(N30W)

을 따라 좌측갱을 그리고 개입구에서 480m 지점에서 동측 날개부 광체를 착백하여 우측갱이 개설되어 있다 (Fig. 1).

한국공항 평해광업소의 조사지역 석회암은 선캠브리아기의 원남통에 속하는 석회암이며, 지질구조는 남북내지 북북동의 주향이동 단층이 발달하고 있다. 한국공항의 평해광산에서 개발을 위해 운영되고 있는 중단들은 20m 간격으로 현재 100, 80, 60, 그리고 40ML 중단이 개설되어 있지만 조사작업은 80과 60ML의 중단에서 실시되었다(Fig. 2).

평해의 경우 채광은 중앙부에 공동이 존재할 가능성으로 대성과 마찬가지로 지질구조상 두 광산 모두 광체의 중앙부분을 채광하지 못하고, 광체의 양쪽 날개부를 따라 개설된 두 개의 주요 운반갱도를 중심으로 채광이 이루어지고 있다. 두 광산 모두 체계적인 채광은 이루어지지 않고 있으며, 주로 주방식(room-and-pillar) 채광법을 채택하고 있다. 그러나 부분적으로는 sublevel stoping도 시도하고 있으며, 광체의 품위에 따라서 변형된 채광법들이 사용되고 있다. 초기에는 pillar과 room 폭의 크기를 일정하게 유지하지만, 석회석의 품위에 따라 수직하중을 pillar가 지탱할 수 있을 정도 크기의 지주만을 남기고 같은 장소에서도 여러 차례의 채광을 실시함으로써 room의 공동이 커지는 경우가 많이 있다.

2. GSI 개요 및 석회석 광산에서의 암반특성

2.1 GSI의 개요

GSI(Geological Strength Index)는 Hoek(1994), Hoek와 Brown(1997) 그리고 Hoek et al(1998)에 의해 제안되었고, 이것이 실험적인 방법이지만 현지암반의 강도(σ_{cm})와 Hoek-Brown 상수 m_b 와 s 뿐만아니라 절리암반의 탄성계수 E_m 과 같은 암반의 역학적 성질을 추정

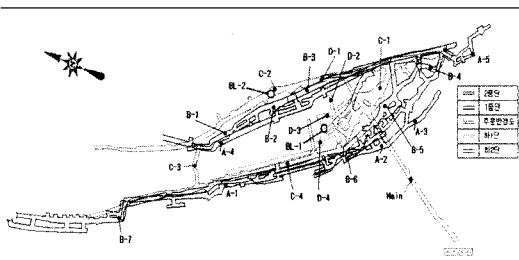
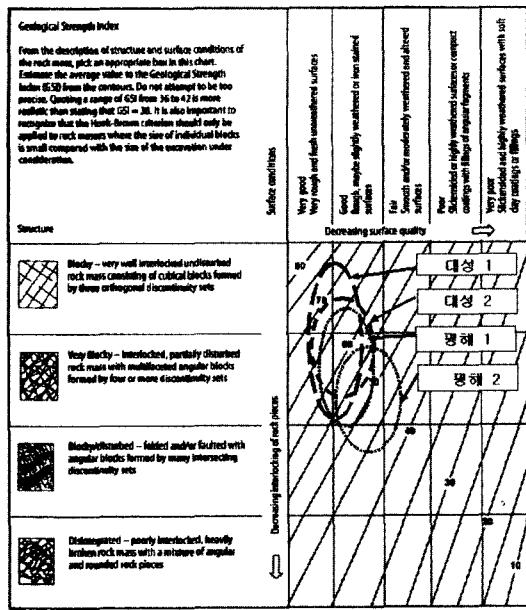


Fig. 1. Underground mine development plan and survey sites of Daesung limestone mine



Fig. 2. Underground mine development plan and survey sites of Pyunghae limestone mine

Table 1. Characterization of rock masses on the basis of interlocking and joint alteration



할 수 있는 시스템을 제공하는 것이다. GSI는 현장에서 육안관측으로 쉽게 사용할 수 있는 실용적인 시스템으로 크게 두 가지 요소로 구성된다. Table 1에서와 같이 암반의 강도를 추정할 수 있는 암반의 구조적인 형태와 절리의 거칠기와 변형정도로 표시되는 불연속면의 표면적인 조건으로 구성된다. 이와 같은 두 요소의 조합으로 매우 견고하게 결합된 암체에서부터 매우 파쇄되어 있는 암반까지 다양한 구조의 암반형태에 대해 묘사할 수 있다. 암반의 형태에 따라서 GSI 값은 Table 1에서와 같이 0에서 100까지의 값을 가질 수 있다.

근본적으로 파괴조건은 암반의 강도와 변형계수를 측정하거나 추정하기 위한 다음의 3개 입력요소에 의존한다. 즉 신선암의 일축압축강도(σ_{ci}), 이 신선암에 대한 Hoek-Brown 상수(m_b)와 암반에 대한 GSI 값이다.

절리암반에서의 일반적인 Hoek-Brown 파괴조건은 다음과 같다.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} [m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s]^a \quad (1)$$

여기서,

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right); \quad (2)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right)$$

그리고 $GSI > 25$ 에 대해 $a = 0.5$

여기서,

σ_1' 과 σ_3' 는 파괴시 최대 및 최소 주응력
 m_b 는 암반에 대한 Hoek-Brown 상수 값
 s 와 a 는 암반의 성질에 좌우되는 상수
 σ_{ci} 는 신선암의 일축압축강도를 나타낸다.

주어진 암반에서 파괴시 주응력을 사이의 관계는 실험 시험에 의해 결정되는 신선암의 일축압축강도 σ_{ci} 와 상수 m_b 에 의해 정의된다. 최대(σ_1') 및 최소(σ_3') 주응력의 관계는 선형적이며, Mohr-Coulomb의 파괴조건은 다음과 같다.

$$\sigma_1' = \sigma_{cm} + k \sigma_3' \quad (3)$$

여기서, σ_{cm} 은 암반에서의 일축압축강도이고 k 는 σ_1' 과 σ_3' 의 상관관계에서의 기울기를 나타낸다.

내부마찰각(ϕ')과 점착강도(c')의 값은 다음 식으로부터 계산될 수 있다.

$$\sin \phi' = \frac{k-1}{k+1} \quad (4)$$

$$c' = \frac{\sigma_{cm}(1 - \sin \phi')}{2 \cos \phi'} \quad (5)$$

가능한 이러한 상수들의 값들은 조심스럽게 준비된 시료에 대해 실시한 3축 압축시험의 결과들에 대한 통계적인 분석을 통하여 결정되어야 한다.

σ_{ci} 와 m_b 의 본래값을 유도하기 위해서 Hoek와 Brown (1997)은 $0 < \sigma_3' < 0.5\sigma_{ci}$ 의 범위를 사용하였다. 또한 일관성을 유지하기 위해 신선암 시료에 대한 3축 실험에서도 같은 범주를 사용하는 것이 필수적이다. Hoek와 Brown의 계수를 결정하기 위해서는 적어도 5개의 측정자료가 있어야 한다. 알고 있는 σ_{ci} 의 값에 대해 $\sigma_{ci} < 100$ MPa인 암반에 대한 암반의 변형계수 E_m (GPa로 표시)은 다음 식으로 표시된다.

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \times 10^{\frac{(GSI-10)}{40}} \quad (6)$$

2.2 대성과 평해 석회석 광산에서의 암반특성

Pillar의 폭은 매우 불규칙적이며 10m 내외인 경우가 많다. 운반갱도 또는 채광공동의 크기는 8~15 m 폭과 6~8 m 높이의 갱도가 운영되고 있지만, 석회석 품위에 따라 2차 또는 3차 추가 채굴로 인해 갱도폭이 20 m 이상이 되는 갱도도 상당부분 존재하고 있다. 폭이 넓은 공동의 벽면이나 pillar의 벽면에서 절리를 따라 박리(spalling)현상이 일어나고 있는 경우도 관찰할 수 있다.

채광장 및 쟁도내에는 많은 작은 용식동굴들이 발달하고 있어 지표수 또는 지하수가 유입되는 수로로 작용하는 경우와 점토로 충전되어 있는 경우도 관측되고 있다. 또한 쟁도 천반에 존재하는 불연속면들의 교차에 의해 형성된 쇄기형 블록들이 작은 규모의 암석편으로 낙석이 발생하는 경우가 빈번하다. 평해광산의 경우는 단층파쇄대의 단층 점토가 지하수에 의해 낙석이 발생된 경우도 있다.

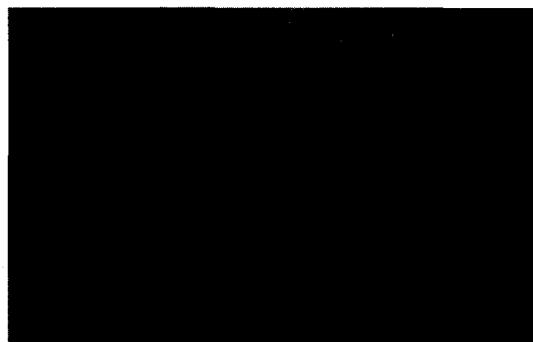
현지암반의 특성은 주로 암반내에 존재하는 불연속면들의 특성에 의해 좌우된다. 따라서 ISRM(International Society for Rock Mechanics)의 규정에 따라 쟁도내에서 암반분류를 위한 불연속면들의 특성에 대한 조사가 이루어졌다. 쟁도벽면에서의 지하수 상태는 일반적으로 암반이 젖어있거나 지하수가 조금씩 떨어지는 상태이며, 이러한 지하수 상태가 불연속면의 전단강도에 영향을 주는 절리의 풍화상태나 충전물 상태에도 상당한 영

향을 주고 있다. 초기지압측정을 위한 시추공의 시추코아 조사에서의 RQD값은 대성의 BL-1 시추공(405와 385ML사이)은 평균 80%이고, BL-2시추공(450과 425ML사이)에서는 평균 83%이었다. 평해광산에서 60과 40ML사이의 시추공 코아의 RQD 값은 75%이었고, 80과 60ML 사이의 시추공 코아의 RQD 값은 평균 50%이었다. 절리들의 틈새분포는 0.05~2 mm이었고, 평균 간격은 일반적으로 20~60 cm로 보통의 간격을 나타내고 있다. 또한 절리의 거칠기는 다소 거친 상태를 나타내며, 표면은 물에 젖은 연약한 점토로 피복되어 있는 경우가 많다.

조사지역 암반의 일반적인 특성은 암반이 견고하게 결합된 고상의 암반에서부터(Fig. 3(a)), 작은 블록으로 파쇄되어 있는 절리암반(Fig. 3(b)), 습곡작용이 있는 암반(Fig. 4(a))과 단층작용이 있는 암반(Fig. 4(b)) 그리고 전단대가 발달하고 있는 암반(Fig. 5)으로 구분되고 있다.



(a) Blocky rock mass : very well interlocked, undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets. (Daesung Mine)



(b) Very blocky rock mass : interlocked, partially disturbed rock mass with prominent four sets of discontinuities (Daesung Mine)

Fig. 3. Blocky rock mass(a) and very blocky rock mass (b)



(a) Blocky/ disturbed rock folded mass (Daesung Mine)



(b) Blocky/ disturbed faulted rock mass (Daesung Mine)

Fig. 4. Blocky and disturbed rock

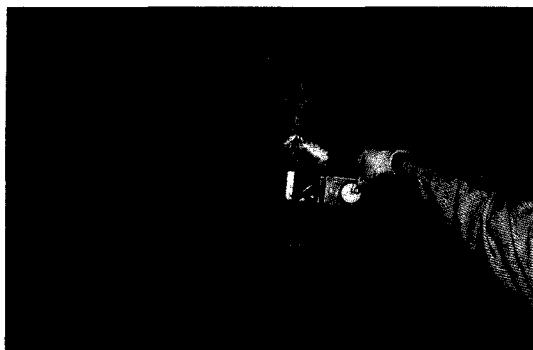


Fig. 5. Tectonically sheared weak rock mass (Pyunghae Mine)

3. 암반분류법으로부터의 암반강도 및 변형계수의 추정

대성과 평해 석회석광산에서 GSI를 작성하기 위한 상세조사가 이루어졌고, 또한 GSI 시스템을 적용하기 위해 신선암 시료를 대상으로 일축압축강도와 탄성계수 그리고 3축 압축시험을 실시하였다. 계수 m_i 와 암반 변형계수 E_m 은 Hoek와 Brown의 작업과정을 따라 계산되었고 그 결과는 Table 2와 같다.

암반상수 m_i 의 값은 GSI에서 제공되는 참조표(Hoek & Brown, 1997)를 사용하는 대신에 σ_{ci} 의 계산된 값과 m_i 의 상관관계(Fig. 6)에 의해 유도된 아래의 상관식(식 7)으로 부터 계산되었다.

$$m_i = 0.037(\sigma_{ci})^{1.26} \quad (7)$$

시추공외의 지역에서의 일축압축강도 값은 점하중시험에 의해 구해졌다. 이러한 암반상수 값들로부터 다른 강도요소들이 계산되었고 그 값들은 Table 2와 같다.

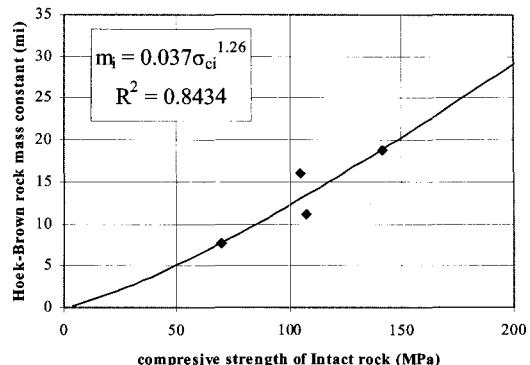


Fig. 6. Correlation between rock mass constants - σ_{ci} and m_i

본 조사에서 관측되는 주요한 문제중의 하나는 GSI의 범위를 결정하는 것이다. 일반적으로 조사표(Table 1 참조)에 하나의 타원형태로 표시되며, 최종 GSI 값은 평균값에서 ±10%정도의 범위를 가지게 된다. 그러나 같은 지역에 구한 RMR값과 GSI의 평균값과의 상관관계를 구하였는데, GSI의 값과 RMR 값이 거의 같은 값을 나타내고 있으며 상관관계는 식 (8)과 같다(Fig. 7의 점선). 반면에 Hoek(1999)는 GSI와 RMR의 상관관계를 아래의 (9) 식과 같이 제시하고 있다(Fig. 7의 실선).

$$GSI = 1.082 RMR \quad (R^2 = 0.70) \quad (8)$$

$$GSI = RMR - 5 \quad RMR > 23 \quad (9)$$

여기서, RMR은 건조상태(지하수 평점=15)에서 그리고 터널방향과 불연속면의 방향과의 보정에서 양호한 방향성(보정치=0)을 갖는 경우에 대해 계산한 것이다.

Bieniawski(1973, 1984)는 RMR시스템에서 암반의 등급을 5개로 구분하여 각 등급에 대한 암반의 특성을

Table 2. Characterization of rock masses of Daesung and Pyunghae mine site based on GSI

	Daesung Mine				Pyunghae Mine			
	Borehole-1		Borehole-2		Borehole-1		Borehole-2	
	GSI	test	GSI	test	GSI	test	GSI	test
RQD	83	-	80	-	50	-	75	-
σ_{ci} (MPa)	141.9	152.0	105.6	110.0	108.2	109.0	69.7	70.0
m_i	18.8	-	16.0	-	11.2	-	7.6	-
σ_{ti} (MPa)	0.40	10.0	0.26	8.0	0.51	10.0	0.21	7.0
σ_{em} (MPa)	37.8	-	23.6	-	22.6	-	11.6	-
c (MPa)	8.56	25	5.67	18	6.04	20	2.78	14
(deg)	40.0	47.4	37.5	48.5	35.2	44.2	28.9	37.4
E (GPa)	2.0	52.5	1.60	47.4	1.78	48.6	1.25	35.6

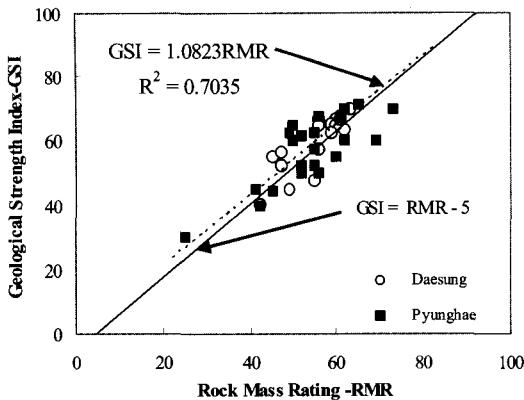


Fig. 7. Correlation between RMR and GSI

나타내는 c_m (암반의 접착강도)과 ϕ_m (암반의 내부마찰각) 값을 제시하고 있다. 이러한 c_m 과 ϕ_m 값들은 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 근거로 하여 암반의 일축압축강도를 계산하기 위한 다음의 관계식에 사용되었고 그 값들은 Table 3에 표시하였다.

$$\sigma_{cm} = 2c_m \cdot \frac{\cos \phi_m}{1 - \sin \phi_m} \quad (10)$$

Kalamaras and Bieniawski(1995)는 암반과 신선암의 압축강도와 연계되는 다음의 (11)식을 제안하였다.

$$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{ci}} = \exp\left(\frac{RMR - 100}{24}\right) \quad (11)$$

식 (11)은 Ramamurthy(1993, 1994)에 의해 제안된 다음 (12)식과 매우 유사하다.

$$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{ci}} = \exp\left(\frac{RMR - 100}{25}\right) \quad (12)$$

동시에 RMR 암반분류법에 의한 암반의 변형계수는 다음 (13)식과 같다.

$$E_m = 2RMR - 100 \quad (13)$$

이것은 Serafim and Pereira(1983)에 의해 $RMR > 50$ 의 암반에 대해 수정이 이루어 졌고 다음의 (14)식을 제안하였다.

$$E_m = 10^{(RMR - 10)/40} \quad (14)$$

Barton(2002)은 신선암의 일축압축강도(σ_{ci})의 영향을 고려하여 Q값을 수정하여 다음 (15)식을 제시하였다.

$$Q_c = Q\sigma_{ci}/100 \quad (15)$$

그리고 제안된 Q_c 값은 암반의 변형계수와 압축강도를 추정하기 위해 다음과 같은 식들로 제안되었다.

$$\sigma_{cm} = 5\gamma Q_c^{1/3} (\text{MPa}) \quad (16)$$

$$\sigma_{tm} = 5\gamma Q_t^{1/3} (\text{MPa}) \quad (17)$$

$$\text{여기서, } Q_t = Q_0 \times I_{50}/4$$

이것은 일축압축강도(σ_{ci})와 접하중강도(I_{50})의 비가 약 25배보다 큰 값을 가지는 강한 이방성을 띠는 암석과 구분하기 위해서다.

그리고 암반의 변형성계수는 다음 (18)과 같다.

$$E_m = 10 Q_c^{1/3} (\text{GPa}) \quad (18)$$

여기서, γ 는 암반의 밀도(g/cm^3)

Q 나 Q_c 값의 범위는 1^3 에서 10^3 까지 매우 넓다. 따라서 $Q_c^{1/3}$ 의 값은 일축압축강도와 암반의 변형계수의 추정치로 간주할 수 있으며, 이 값은 0.1에서 10까지의 값을 가지지만 실제적으로는 1에서 100의 값을 갖게 된다. 식 (10)~(18)을 사용하여 암반의 강도와 변형계수가 계산되었고 Table 3에 표시하였다.

Table 3. Estimation and comparison of σ_{cm} and E_m values according to GSI, RMR and Q systems for σ_{ci} values given in Table 2

RMR	Q	GSI	σ_{cm1} (MPa)	σ_{cm2} (MPa)	σ_{cm3} (MPa)	E_i (GPa)	E_{m1} (GPa)	E_{m2} (GPa)	E_{m3} (GPa)	$\frac{E_{m1}}{\sigma_{cm1}}$	$\frac{E_{m2}}{\sigma_{cm2}}$	$\frac{E_{m3}}{\sigma_{cm3}}$
59	6.6	62	37.79	1.09	28.46	52.5	2.0	4.99	21.08	52.92	4541	740.7
56	6.0	58	23.64	0.91	24.98	47.4	1.60	3.79	18.57	67.68	4167	740.7
58	7.0	60	22.60	0.95	26.51	48.6	1.78	4.35	19.64	78.76	4579	740.7
52	5.0	57	11.57	0.85	20.47	35.6	1.25	2.13	15.18	108.0	2505	740.7

(주) σ_{cm1} & E_{m1} refers to GSI; σ_{cm2} & E_{m2} refers to RMR; σ_{cm3} & E_{m3} refers to Q system

Table 2에서 Bieniawski에 의해 제안된 식 (10)에 의한 c_m 과 ϕ_m 값에 의해 구해진 암반의 강도값은 GSI나 Q system에 의해 구해진 강도값에 비해 너무 낮게 나타나고 있다. RMR로부터 구한 암반의 강도값은 매우 연약한 암반의 범주에 놓이게 된다. 따라서 이와 같이 RMR을 이용하여 결정된 암반강도에 있어서는 한계를 가지게 되는 것을 볼 수 있다.

계수비(Modulus ratio)는 암반의 강도에 대한 암반의 변형계수의 비(E/σ)로 정의되며 이것은 응력-변형율곡선이 선형인 부분에서의 변형율의 역수($1/\epsilon$)를 나타낸다(Ramamurthy, 1993, 1994). 모든 암반분류법에 있어서 암반의 강도와 변형계수의 신뢰도를 시험하기 위한 방법중의 하나가 계수비를 비교하는 것이다(Ramamurthy, 1993, 1994).

Table 2에서와 같이 Q시스템에 의해 구해진 계수비의 값들(E_m/σ_{m3})은 일정한 것을 볼 수 있다. 이것은 일정한 밀도를 갖는 주어진 암반에 대해 식 (16)~(17)을 사용하여 계산한 계수비의 값은 Q의 변화와 관계없이 일정한 값을 갖게 된다. 이것은 Q시스템을 이용하여 암반강도 값을 추정하는 것에는 문제가 있음을 나타낸다. 이와 달리 GSI시스템에서는 서로 다른 GSI값에 대해서 계수비의 값이 변화하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 상기와 같은 이유로 GSI는 RMR이나 Q시스템에 비해서 암반의 성질을 추정하는 데 있어 보다 나은 방법임을 알 수 있다.

일축압축조건이나 또한 낮은 봉압이 작용하는 대부분 암석은 선형적으로 반응한다(Ramamurthy, 1993). 따라서 낮은 봉압이 작용하는 암반에서도 거의 비슷한 선형적인 관계가 존재할 것이다. 이러한 경우에 GSI시스-

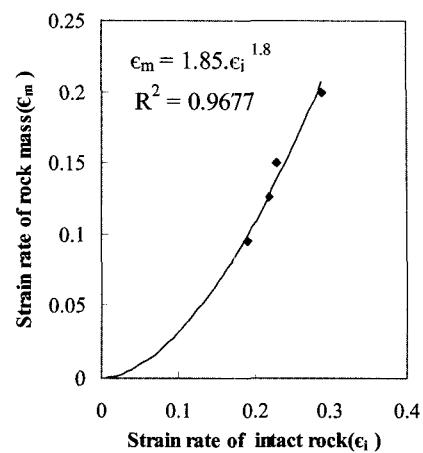


Fig. 8. Correlation of strain rates of intact rock material(ϵ_i) and rock mass(ϵ_m).

템의 식 (1)~식 (6)으로부터 계산된 암반의 계수나 강도로부터 암반의 변형율을 구하는 것이 가능하다. 본 분석에서 실험실의 일축압축 시험에서 구한 신선암의 변형율과 GSI시스템의 식 (1)~식 (6)로부터 계산된 현지암반에 대한 변형율값과의 비교에서 두 값들은 비선형적인 비례를 나타내며 상관관계는 $R^2 = 0.97$ 로 매우 높은 것을 볼 수 있다(Fig. 8).

4. 암반강도와 변형계수에 근거한 암반분류 도구로서의 GSI

실험실에서 구한 역학적 성질과 GSI를 사용하여 계산된 암반의 역학적 성질에 대한 비교를 실시하였다.

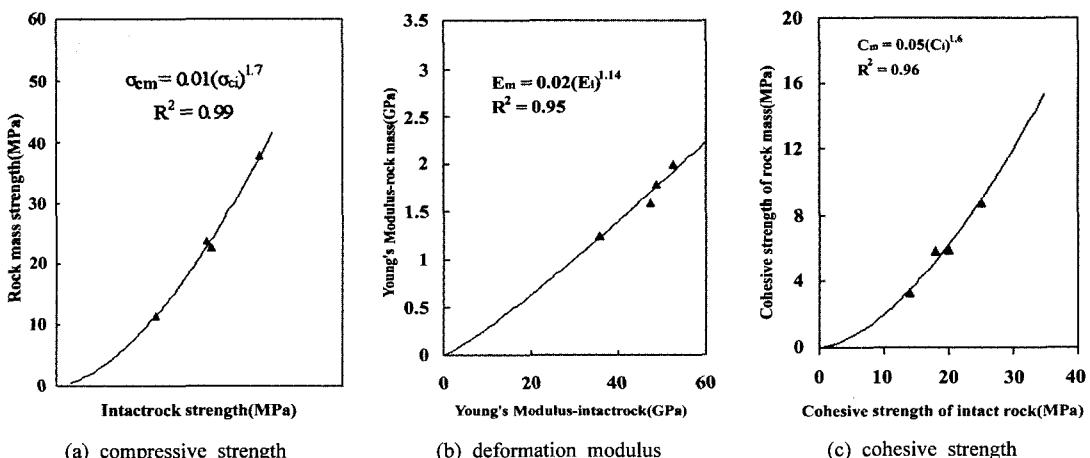


Fig. 9. Comparison of mechanical properties of intact rock with the rock mass properties obtained from GSI system

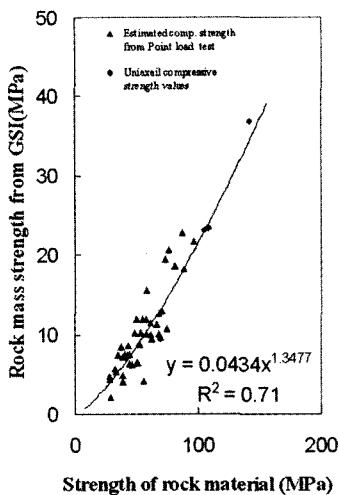


Fig. 10. Comparison of estimated compressive strength of irregular samples from point load test to the rock mass strength values obtained by GSI

Fig. 9와 같이 물성에 대한 상관관계가 $R^2=0.95$ 이상으로 모두 좋은 상관관계를 나타내고 있다. GSI에 대한 조사는 약 44개의 측점에서 실시되었다. 모든 지점에 대한 암반에 대한 일축압축시험을 실시하는 것이 불가능했기 때문에 점하중강도로 일축압축강도를 추정하였다. Fig. 10은 점하중으로부터 구한 일축압축강도와 계산에 의한 암반의 압축강도의 관계를 나타내는 것으로

좋은 상관관계를 나타내고 있음을 볼 수 있다.

광산에서는 도로터널과는 달리 광산의 채광활동과 함께 공동의 수가 점차적으로 확대되면서 암반의 성질은 점차적으로 약화된다. 반면에 광산의 수명이 다할 때까지 신선암의 강도는 변화없이 일정하게 유지된다고 볼 수 있다. 그러므로 암반과 관련되는 GSI의 값은 광산의 수명과 함께 점차적으로 저하되는 것은 피할 수 없을 것이다. 따라서 광산의 운영에 따라 GSI의 값의 변화가 동반되기 때문에 이에 따른 암반의 강도와 변형계수의 변화를 알아보기 위하여 GSI 값을 10에서부터 90까지 임의로 변화시켜 값의 변화를 살펴보았다. 대성광산과 평해광산에서의 신선암에 대한 일축압축강도의 최대 평균값이 각각 141.9과 69.7 MPa이었기 때문에, 이 값을 근거로 GSI값의 변화에 따른 암반물성의 변화는 Table 4와 같이 된다.

Table 4에서 GSI 값이 90에서 10으로 변화됨에 따라 계수비도 같이 감소되는 것을 볼 수 있다. 여기서 계수비의 값 1010의 의미는 변형율이 0.1%임을 나타낸다. 또한 평해광산에서 GSI 값이 90에서 10까지 변화시켜면 암반강도가 약 99.0MPa에서 12.0MPa까지 낮아지며, 변형율은 0.1%에서 1.2%로 증가하는 것을 볼 수 있다.

Ramamurthy(1993)는 암반의 변형율에 기초를 둔 암반분류를 Table 5와 같이 제시하였다. 대성과 평해석회석 광산의 모든 측점에서 점하중강도로 구한 암반의 암

Table 4. Estimation of σ_{cm} and E_m for intact rock strength $\sigma_{ci}=141.9$ and 69.7 MPa for GSI values

GSI	For $\sigma_{ci}=141.9$ MPa				For $\sigma_{ci}=69.7$ MPa			
	σ_{cm} (MPa)	E_m (GPa)	E_m/σ_{cm}	Strain ($\epsilon\%$)	σ_{cm} (MPa)	E_m (GPa)	E_m/σ_{cm}	Strain ($\epsilon\%$)
90	99.0	100000.0	1010.3	0.10	43.1	83456.6	1935.5	0.05
80	66.9	56234.1	840.9	0.12	27.2	46931.1	1727.9	0.06
70	47.9	31622.8	661.1	0.15	18.1	26391.3	1455.7	0.07
60	35.8	17782.8	496.1	0.20	12.8	14851.6	1156.6	0.09
50	27.8	10000.0	359.7	0.28	9.5	8351.7	875.5	0.11
40	22.1	5623.4	254.6	0.39	7.4	4696.5	639.0	0.16
30	17.9	3162.3	177.2	0.56	5.8	2641.0	453.8	0.22
20	14.6	1778.3	122.0	0.82	4.7	1485.2	316.7	0.32
10	12.0	1000.0	83.3	1.20	3.8	835.2	218.7	0.46

Table 5. Classification based on failure strain (Ramamurthy, 1993 & 1994)

Class	Description	Failure strain($\epsilon_{im}\%$)
A	Very high failure strain	> 2
B	High Failure strain	1 ~ 2
C	Medium failure strain	0.5 ~ 1.0
D	Low failure strain	0.2 ~ 0.5
E	Very low failure strain	< 0.2

Table 6. ISRM classification based on the intact rock strength [ISRM, 1978]

Strength (MPa)	Description
> 250	Very high strength
100 ~ 250	High strength
50 ~ 100	Moderate strength
25 ~ 50	Medium strength
5 ~ 25	Low strength
< 5	Very low strength

축강도는 30~90MPa로 ISRM의 강도기준으로는 보통 정도의 강도 값을 나타내고 있으며(Table 6), 반면에 GSI시스템으로 구한 현지암반의 압축강도값은 5에서 25MPa의 값을 나타내고 있다(Appendix 1 참조). GSI로부터 구한 변형율의 범위는 0.01%에서 0.2% (Appendix 1 참조)로 Table 5에 의하면 E등급으로 지하갱도의 암반이 매우 낮은 변형율(low failure strain)을 나타냄으로써 안전한 조건을 나타내고 있다.

5. 결 과

광산에서 갱도의 안정성 평가와 갱도 지보설계를 위한 일반적인 기준이 되는 분석 시스템이 없기 때문에 현재 널리 사용되고 있는 암반분류법인 RMR과 Q 시스템을 석회석광산에서의 갱도 및 채광장의 안정성 설계를 위한 현장조사를 통해 이러한 암반분류법이 중요한 실제적인 도구로서 사용될 수 있음을 확인했다. 현재의 연구에서는 암반분류시스템인 RMR과 Q 시스템을 대성과 평해 광산에서 석회석 광산현장에 적용할 수 있도록 약간의 수정이 이루어 졌으며, 또한 광산갱도의 안전한 무지보 폭을 결정하기 위한 도구로서 적용되었다(Rao, 선우춘 외, 2003).

RMR과 Q시스템은 암반 등급분류에 있어서는 매우 포괄적이고 효과적일지라도 암반의 강도나 변형계수를 결정하는 데 있어서는 앞에서 언급된 것처럼 다소의 제약을 가지고 있다. 반면에 이와 관련하여 GSI 시스템이 암반의 공학적 성질을 추정하는 데 있어서 더 효과적이다. 또한 실험실에서 구한 역학적 성질과 GSI를 사용하여 계산된 암반의 역학적 성질에 대한 비교에서도 좋은 상관관계를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 따라서 지하구조물의 설계를 위한 수치적인 해석에 있어서 효과적으로 암반과 관련된 입력자료로 사용될 수 있을 것이다.

조사 광산의 모든 측점에서 접하중강도로 구한 암반의 압축강도는 30~90 MPa로 ISRM의 강도기준으로는 보통정도의 강도 값을 나타내며, 반면에 GSI시스템으로 구한 현지암반의 압축강도값은 5에서 25 MPa의 값을 나타냄으로써 현지암반의 강도가 신선암에 비해 많은 강도저하를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 또한 GSI로부터 구한 변형율의 범위는 0.01%에서 0.20%의 값으로 전체적으로 E등급에 속하며 지하갱도의 암반들은 매우 낮은 변형율을 나타냄으로써 안전한 조건을 나타내고 있다.

현재는 2개의 석회석 광산을 중심으로 이루어진 연구 결과로 이루어졌지만, 계속적으로 다른 석회석 광산으로의 조사를 확대하여 보다 많은 자료를 확보함으로써

앞으로 국내의 모든 석회석 광산에 공통적으로 적용할 수 있는 포괄적이며 일반적인 기준 제시뿐만 아니라 다른 암반에서의 대형갱도 굴착에도 응용될 수 있을 것으로 본다.

참고문헌

- Barton N., Lien R., Lunde J., 1974, Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, Rock Mechanics, 6.4, 185-216.
- Barton N., 2002, Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., 39.2, 185-216.
- Bierniawski Z.T., 1973, Engineering classification of rock masses. Trans S. Afr Inst Civ. Eng., 15.12, 335-344.
- Bierniawski Z.T., 1984, Rock mechanics design in mining and tunneling. Rotterdam, A.A. Balkema, p.272.
- Bierniawski Z.T., 1989, Engineering rock mass classification, John Wiley & sons, New York, p.251.
- Bierniawski Z.T., 1993, Classification of rock masses for engineering: the RMR system and future trends. In: Hudson J.A., editor, Comprehensive rock engineering, Vol. 3, U.K., Pergamon Press, 553-573.
- Brown E.T.(Ed), 1981, Rock Characterization, testing and Monitoring - ISRM Suggested Methods, Pergamon Oxford, 171-183.
- Cai M., Kaiser P.K., Uno H., Tasaka Y. and Minami M., 2004, Estimation of Rock mass deformations modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.41, pp3-19.
- Hoek E., 1994, Strength of rock and rock masses, ISRM News Journal, 2.2, 4-16.
- Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F., 1995, Support of underground excavations in hard rock, Rotterdam, Balkema, p.215.
- Hoek E. and Brown E.T., 1997, Practical estimates of rock mass strength, Int. J. of Rock Mech Min Sci., 34.8, 1165-1186.
- Hoek E., Marinos P., Benissi M., 1998, Applicability of the geological strength index(GSI) classification for very weak and sheared rock masses -The case of Athens Schist Formation, Bull Eng. Geol. Env., Vol. 57, 151-160.
- Hoek E., 1999, Rock engineering course notes. <http://www.rockscience.com>.
- ISRM, 1978, Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 5.6, 319-368.
- Kalamaras G.S., Bierniawski Z.T., 1995, A rock strength concept for coal seams incorporating the effect of time, Proceed. of the 8th International Congress on Rock Mechanics, Vol. 1, 295-302.
- Kendorski F.S., Cummings R.A., Bierniawski Z.T., Skinner E.H., 1983, Rock mass classification for block caving mine drift support, In: Proceedings of the Fifth ISRM, B, Melbourne, Australia, 51-63.

17. Kirkaldie L., 1988, Rock classification systems for engineering purposes. STP-984: American Society of Testing Materials; p.167.
18. Koçkar M.K., Akgün H., 2003, Methodology for tunnel and portal support design in mixed limestone, schist and phyllite conditions: a case study in Turkey, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 40, 173-196.
19. Lama R.D. and Vutukuri V.S., 1978, Hand book on mechanical properties of rocks, Vol. II Trans Tech Publications, Clausthal, Germany, p.232.
20. Laubscher D.H., 1986, Geomechanics Classification of Jointed Rock Masses-Mining Applications, Trans. Inst. Min. Metall., ppA1-A7.
21. Palmström A., 1996, Characterizing rock masses by the RMi for use in practical rock engineering, Part 1: the development of the rock mass index (RMi), Tunelling and Underground Space Technology, vol. 11(2), 175-188.
22. Potvin Y., 1988, Empirical Open Stope Design in Canada, Ph.D. thesis, The university of British Columbia, p.350.
23. Ramamurthy T. and Arora V.K., 1991, A simple stress-strain model for jointed rocks, Proceedings of the 7th International Congress of Rock Mechanics, Aachen, Germany, Vol. 1, 323-326.
24. Ramamurthy T., 1993, Strength and modulus responses of anisotropic rocks, In Hudson J.A. editor, Comprehensive rock engineering, Vol.1, U.K., Pergamon Press, 313-329.
25. Ramamurthy T., Arora V.K., 1994, Strength predictions for jointed rocks in confined and unconfined states. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 13.1, 9-22.
26. Rao UM Karanam, 선우준, 정소걸, 최성웅, 전양수, 2003, A suggestion of rock mass classification systems for stability of underground limestone mines -A case study, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 13.6, 421-433.
27. Serafim J.L., Pereira J.P., 1983, Considerations of the Geomechanics classification of Bieniawski, Proceedings of the Int. symp. Eng. Geology and Underground Construction. LNEC, Lisbon, 1.II-33-II-42.

선 우 준



1978년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1984년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1985년 Paris VI 대학(in France) DEA
1988년 Paris VI 대학 지구구조학과(in
France) 공학박사
Tel: 042-868-3235
E-mail: sunwoo@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부
자원개발안전연구실장, 책임연구원

정 소 걸



1989년 고려대학교 공과대학 토목공학과
공학사
1991년 고려대학교 대학원 토목공학과
공학석사
1998년 미국 조지아공과대학 토목공학과
공학박사
Tel: 042-868-3231
E-mail: skchung@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구
부 책임연구원

Karanam U. M. Rao



1983년 Osmania University(in India)
공학사
1987년 Banaras Hindu University(in
India) 공학석사
1994년 Indian Institute of Technology
(in India) 공학박사
Tel: 042-868-3231
E-mail: umr@mining.iitkgp.ernet.in
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부
Post Doc.

전 양 수



1996년 전남대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1998년 전남대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2002년 전남대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 042-868-3249
E-mail: ysjeoon@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부
선임연구원

Appendix 1 : Rock mass characterization based on GSI (see Fig. 1 and 2)

Mine	Site	UCS (MPa)	GSI Range	σ_{cm} (MPa)	E_m (MPa)	E_m / σ_{cm}	Strain (ϵ_m)
Daesung Mine	A-1	54.6	58-75	11.86	19660.58	1657.79	0.06
	A-2	51.1	45-60	6.50	8020.67	1237.38	0.08
	A-3	88.9	45-60	18.22	16776.25	920.942	0.11
	A-4	58.1	50-65	11.93	18059.84	1513.82	0.07
	A-5	38.7	45-65	4.9	8298.80	1705.20	0.06
	MAIN	37.7	62-78	8.52	19493.59	2288.25	0.04
	B-1	34.8	60-75	7.42	16673.78	2248.05	0.04
	B-2	43.2	58-75	8.60	16991.90	1977.64	0.05
	B-3	40.1	58-73	7.53	15455.11	2052.31	0.05
	B-4	38.7	58-72	7.20	15182.93	2108.45	0.05
	B-5	44.7	-	-	-	-	-
	B-6	44.6	48-65	6.26	9708.84	1551.43	0.06
	B-7	53.2	55-72	10.25	16328.86	1593.06	0.06
	C-1	29.1	33-48	2.03	3028.30	1491.04	0.07
	C-2	43.1	50-75	7.35	13481.51	1834.22	0.06
	C-3	39.3	35-55	3.99	8359.81	20866.04	0.005
	C-4	32.7	55-75	5.70	13560.44	2377.36	0.04
	D-1	28.2	55-75	4.79	12592.87	2629.54	0.04
	D-2	46.4	40-55	6.21	9064.02	1458.65	0.07
	D-3	28.4	55-70	4.34	10962.82	2525.99	0.04
	D-4	59.4	58-75	12.98	19924.77	1534.88	0.06
Pyunghae Mine	60-1-1	58.1	43-60	10.03	13554.60	1351.41	0.07
	60-1-2	49.9	55-70	11.87	22360.68	1883.80	0.05
	60-2	76.5	60-80	20.59	27658.63	1343.30	0.07
	60-3	69.5	30-50	9.56	8336.67	872.04	0.11
	60-4-1	62.2	40-50	9.90	5914.19	597.39	0.17
	60-4-2	62.2	40-50	11.41	7886.70	691.03	0.14
	60-5	67.6	55-75	10.10	16404.89	1624.25	0.06
	60-6	58.0	63-80	15.54	27021.78	1738.85	0.06
	60-7-1	75.0	30-50	10.70	8660.25	809.07	0.12
	60-7-2	55.7	30-50	4.10	2360.85	575.82	0.17
	60-8	50.6	37-52	6.42	7981.33	1243.20	0.08
	60-9	52.3	45-60	8.67	12860.29	1478.36	0.07
	60-10	48.5	62-72	10.18	18529.81	1820.22	0.05
	80-2	66.1	50-65	11.28	12875.73	1140.45	0.09
	80-3-1	87.2	60-75	22.86	26318.32	1150.78	0.09
	80-3-2	44.4	53-70	7.52	13295.10	1770.32	0.06
	80-4-1	33.8	55-70	5.28	11600.01	2196.97	0.05
	80-4-2	62.7	55-70	9.50	10559.27	1113.85	0.09
	80-5	96.3	48-62	21.66	19580.02	903.97	0.11
	80-6	69.9	50-70	12.97	14867.52	1147.19	0.08
	80-7-1	68.2	45-60	12.61	14685.62	1163.68	0.09
	80-7-2	73.2	50-70	19.46	27055.60	1391.03	0.07
	80-8	80.9	65-75	18.59	21329.18	1147.35	0.09