

## 세르샤 마모시험을 통한 암석의 마모도 측정에 관한 연구

이수득, 정호영, 전석원\*

## Determination of Rock Abrasiveness using Cerchar Abrasiveness Test

Sudeuk Lee, Ho-Young Jung, Seokwon Jeon\*

**Abstract** Abrasiveness of rock plays an important role on the wear of rock cutting tools. In this study, Cerchar abrasiveness tests were carried out to assess the abrasiveness of 19 different Korean rocks. Cerchar abrasiveness test is widely used to assess the abrasiveness of rock because of its simplicity and inexpensive cost. This study examines the relationship between Cerchar Abrasiveness Index (CAI) and mechanical properties (uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, Young's modulus, Poisson's ratio, porosity, shore hardness of rock), and the effect of quartz content, equivalent quartz content, which was obtained from XRD analysis. As a result of test, CAI was more influenced by petrographical properties than by the bonding strength of the matrix material of rock. CAI prediction model which consisted of UCS and EQC was proposed. CAI decreased linearly with the hardness of the steel pin. Numerical analysis was performed using Autodyn-3D for simulating the Cerchar abrasiveness test. In the simulations, most of pin wear occurred during the initial scratching distance, and CAI increased with the increase of normal loading.

**Key words** Cerchar abrasiveness test, CAI, Abrasiveness, Equivalent quartz content

**초 록** 본 연구에서는 암석 절삭 장비의 마모에 직접적인 영향을 주는 인자인 암석의 마모도(abrasiveness) 측정에 관한 연구를 수행하였다. 몇 가지 방법 중 세르샤 마모 시험(Cerchar abrasiveness test)을 통하여 암석의 마모도에 영향을 미치는 인자를 확인하고 효율적인 시험을 수행하기 위한 조건들을 연구하였다. 국내 19종 암석에 대한 시험 결과를 통하여, 세르샤 마모 지수(CAI, Cerchar Abrasiveness Index)에 영향을 미치는 암석의 역학적 물성(단축압축강도, 간접인장강도, 탄성계수, 포아송비, 공극률, 쇼어경도)과의 상관관계를 찾아보았고 X선 회절 분석을 통하여 암석의 구성 광물 중 마모도에 가장 큰 영향을 미치는 석영 함량, 등가 석영 함량과의 관계도 확인하였다. 그 결과로 암석의 입자 결합 특성보다 광물의 특성이 CAI에 영향을 더 미치는 것으로 관찰되었고, 단축압축강도와 등가 석영함량의 함수로 CAI를 예측하는 모델을 제시하였으며 핀의 경도가 커질수록 CAI값이 선형적으로 작아짐을 확인하였다. 수치해석적 연구를 통해 세르샤 마모 시험을 모사한 결과 초기 급힘 거리에서 대부분의 마모가 발생함을 확인하였고 하중이 증가할수록 CAI값이 증가함을 확인하였다.

**핵심어** 세르샤 마모 시험, 마모도, 등가 석영 함량, CAI

## 1. 서론

암석의 마모도(abrasiveness)는 TBM에 장착되는 디스크 커터를 포함한 암석 절삭 장비의 마모에 큰 영향을 미치는 것으로 잘 알려져 있다(West, 1981). 마모도란 암석이 암석 절삭 장비의 마모에 영향을 미치는 정도를 나타내는 지표로 이를 측정하기 위하여 여러 가지 방법들이 사용되고 있으며 Norwegian University of

**Received:** Aug. 21, 2012

**Revised:** Aug. 24, 2012

**Accepted:** Aug. 24, 2012

**\*Corresponding Author:** Seokwon Jeon

Tel) +8228808807, Fax) +8228718938

E-Mail) sjeon@snu.ac.kr

Seoul National University, 599 Gwanak-ro Gwanak-gu, Seoul, Korea

Technology(NTNU) 마모시험(NTNU abrasion test)과 세르샤 마모시험(Cerchar abrasiveness test)을 대표적인 방법이라 할 수 있다. 이 시험법들은 TBM 성능 예측 모델인 NTNU 모델과 Colorado School of Mine(CSM) 모델에서 커터 마모율 예측을 위한 입력변수로 각각 사용되고 있다(Rostami et al., 1996). 하지만 NTNU 모델은 노르웨이 현지 지반에서 경험적으로 얻은 데이터를 기반으로 한 모델이고 CSM 모델에서는 세르샤 시험의 활용방법이 공개되어 있지 않아 두 모델을 그대로 국내에 적용하는 데는 문제가 있다. 따라서 국내 지반 조건과 암중에 맞는 표준 시험법으로서 마모도 측정에 관한 연구가 필요하다(Jung et al, 2012). 따라서 본 연구에서는 국내 19개 암중에 대하여 세르샤 마모 시험을 수행하고 각 암중에 대한 마모 특성과 기본 역학적 물성, 광물 함량과의 관계를 규명하고자 하였으며 추가적으로 수치해석적 연구를 통해 굽힘 거리에 따른 핀의 변형과정과 하중에 따른 특성을 확인하였다.

## 2. 암석의 마모도 측정법

암석의 마모도를 정량화하기 위한 방법은 크게 암석학적 방법(petrological)과 직접시험방법(mechanical)으로 나눌 수 있다. 암석학적 방법은 암석에 포함된 광물의 특성들로 암석의 마모도를 추정하는 방법이고 직접 시험법은 암석 시험편에 대하여 직접적인 시험을 수행하여 암석의 마모도를 측정하는 방법이다. 두 가지 방법에 대하여 잘 알려진 내용을 정리하면 다음과 같다.

### 2.1 Rosiwal 경도

광물의 경도를 나타내는 기준의 하나인 모오스 경도의 단점은 10개의 표준 광물에 대한 상대적인 경도의 정도만을 나타낼 뿐, 절대적인 값이 아니라는 것이다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 Rosiwal (1896)은 광물과 암석의 경도를 정량적으로 측정한 지수를 제안하였다.

시험법은 입자크기 0.2 mm의 광물 파우더 100 mg을 400 mm<sup>2</sup>의 금속이나 유리 디스크에 일정한 하중으로 5~8분 동안 회전 그리안당한 후 금속 또는 유리 디스크의 손실된 질량을 측정한다. 그 뒤에 강옥(corundum) 파우더에 대한 금속이나 유리의 손실된 질량을 1000이라 할 때, 구하고자 하는 각각의 광물에 의한 손실량의 비로 Rosiwal 경도가 정해지게 된다. Rosiwal 경도는 암석이나 광물의 연삭마모에 대한 저항 정도를 측정하는데 많이 사용되고 있다.

### 2.2 석영 함량과 등가 석영 함량

석영의 경도가 절삭 장비의 경도보다 일반적으로 크기 때문에 석영의 함량은 절삭장비 마모에 큰 영향을 미친다. 석영의 함량을 구하는 방법으로는 편광현미경을 이용한 박편의 모달 분석(modal analysis, modal counting)과 암석 분말의 X-선 회절분석(X-ray Diffraction Analysis, XRD)방법이 있다. 두 가지 분석방법을 이용하여 암석을 구성하는 광물비를 구할 수 있지만 광물의 입자 크기에 따라 선호되는 방법이 다를 수 있다. 입자가 작고 고온 암석의 경우에는 모달 분석수행 시 카운트의 어려움이 있어 X-선 회절분석이 보다 효과적이며, 비교적 큰 입자의 암석에서는 모달 분석이 선호된다.

등가 석영 함량(equivalent quartz content)은 식 (1)과 같이 시료에 포함된 석영의 함량비와 석영을 제외한 다른 광물의 함량비를 각각 석영의 경도에 해당하는 값으로 환산하여 가중평균을 구한 것을 말한다. 여기서 사용되는 경도는 Rosiwal 경도이며 석영의 Rosiwal 경도를 100%로 하고 나머지 광물의 경도를 석영의 경도에 대한 비로 계산한다.

$$EQC = \sum_{i=1}^n (A_i \times R_i) \quad (1)$$

여기서, EQC는 등가 석영함량(equivalent quartz content, %), A는 광물의 구성 비율(%), R은 해당 광물의 상대 Rosiwal 경도(%), n은 광물 종류의 수를 나타낸다.

### 2.3 세르샤 마모 시험

세르샤 마모 시험은 프랑스의 Cerchar Institute (Centre d' Etudes et Recherches de Charbonnages de France)에서 1986년에 개발한 암석의 마모도 측정 시험법이다. 이 시험법은 비교적 간편하고 암석에 대한 금속의 마모 정도를 경제적으로 산정할 수 있으며 여러 연구자들에 의해 그 적용성이 검증된 바 있다.

시험방법은 70 N의 수직하중을 받는 핀을 암석 표면에 수직으로 접촉시킨 뒤 10 mm를 굽어서 핀의 마모된 면의 직경을 측정하여 세르샤 마모 지수(Cerchar Abrasiveness Index, CAI)를 구한다. 한 시험에는 총 5개의 핀이 사용되며 각각의 핀을 시험하고자 하는 암석의 새로운 표면에 위치시켜 굽는다. 5회의 굽힘 시험을 수행할 시 대개 3회의 시험은 동일한 방향으로 실시하고 나머지 2회는 그와 수직한 방향으로 실시하여 시험편의 이방성 영향을 줄이도록 한다. 사용된 5개 핀의 마모된 면(wear flat)의 직경을 Fig. 1과 같이 굽힘 진행 방향과 이에 수직한 방향으로 측정한다. 이렇게 구한 총 10개의 직경 측정값의 평균을 구하고 평균값에 10을 곱하면 CAI를

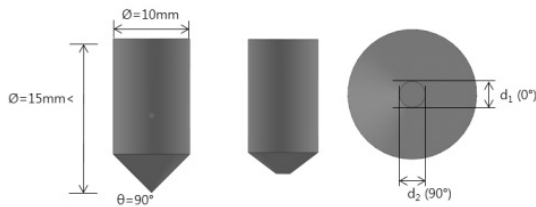
구할 수 있다. 이를 식으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$CAI = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} d_i \times 10 \quad (2)$$

$d_i$  = diameter of wear flat

시험에 사용되는 핀의 팁(tip)은 90°각도를 이루는 원뿔 형상이고 길이 15 mm 이상, 폭 10 mm 이상이어야 하며 핀의 재료는 로크웰 경도(Rockwell Hardness)를 알고 있는 금속 재료를 사용해야 한다. 세르샤 시험에서 경도의 기준은 로크웰 경도 스케일 C(HRC)이며 ASTM 표준시험법(D-7625-10, 2010)에서 제시하고 있는 핀의 경도는 HRC55이다.

세르샤 마모시험기는 Cerchar Institute에서 제안된 형식과 West(1989)에 의해 수정된 형식 두 가지가 있으며 원래의 Cerchar 장비는 Fig. 2(a)와 같이 고정된 암석에 대하여 핀을 이동시켜 긁는 방식이고 West에 의하여 수정된 장비는 Fig. 2(b)와 같이 고정된 핀에 대하여 암석을 이동시켜 긁는 방식이다. 본 연구에서는



**Fig. 1.** Diagram of the pin specification and the typical wear flat of the pin after Cerchar abrasiveness test ( $d_1(0^\circ)$ : diameter of wear flat parallel to the direction of scratch and  $d_1(90^\circ)$ : diameter of wear flat perpendicular to the direction of scratch)

West 형식의 장비를 구축하여 세르샤 시험을 수행하였다.

핀 마모면의 직경을 정밀측정하기 위하여 ASTM 표준 시험법에서는 배율 30배 이상의 광학 현미경을 사용할 것을 추천하고 있으며 측정 정밀도가 0.001 mm 이하가 되어야 한다.

시료는 입자 크기나 광물 함량 등 암석의 특성을 대표하는 위치에서 채취한 것을 사용하여야 한다. 또 시료의 표면은 편평한 절리면(natural cut)과 연마면(smooth cut)에서 수행할 수 있다. 그러나 편평한 절리면에서 시험을 할 경우 일정한 거칠기를 가지는 시편을 얻기 어렵고 성형이 어려우므로 해머로 절단한 시료의 표면이나 간접인장시험에서 발생한 파괴면을 사용하여 시험을 수행한다.

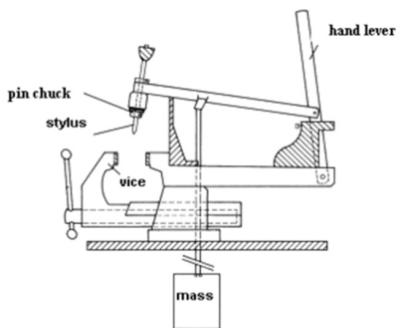
본 시험에서는 정밀도 0.97  $\mu\text{m}$ 의 광학현미경을 이용하였고 암석의 연마면에 대하여 시험을 수행하였다.

### 3. 시험 결과 및 분석

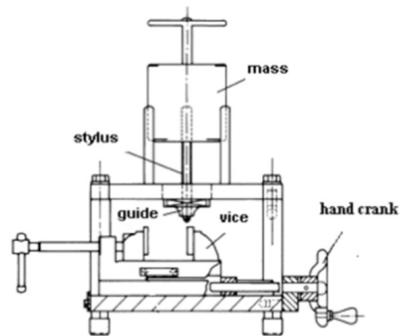
#### 3.1 암석 기본물성과의 관계

Atkinson 등(1986)은 암석의 마모도에 영향을 미치는 인자들을 광물의 구성, 구성광물의 경도, 입자의 모양과 크기, 결합 물질의 종류, 암석의 물성(강도, 경도, 인성 등) 등 5개로 분류하였다. 이 분류를 크게 2가지로 요약하면 암석의 마모도는 광물의 특성(광물 구성, 경도, 모양, 크기 등)과 암석입자의 결합 특성(단축강도, 인장강도 등)의 함수로 표현 가능하다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 Table 1에 정리된 국내 19종의 암석에 대하여 세르샤 마모 지수와 암석의 단축압축강도, 간접인장강도, 탄성계수, 포아송비, 공극률, 쇼어경도, 광물 함량과의 상관관계를 분석하였다. 그 결과는 Table 2와 같다.



(a) Original Cerchar equipment



(b) West Cerchar equipment

**Fig. 2.** Schematic diagram of original Cerchar and West Cerchar equipment (ASTM, 2010)

**Table 1.** Rock types and sampling locations

No.	Type of origin	Rock type	Location
1	Igneous rocks	Hwangdeung Granite #1	Jeollabuk-do Jinan
2		Hwangdeung Granite #2	Jeollabuk-do Jinan
3		Pochon Granite #1	Gyeonggi-do Pochon
4		Pochon Granite #2	Gyeonggi-do Pochon
5		Pochon Granite #3	Gyeonggi-do Pochon
6		Sangju Granite	Gyeongsangbuk-do Sangju
7		Propylite	Gangwon-do Hongcheon
8		Granophyre	Jeollanam-do Yeosu
9		Diorite	Jeollanam-do Goheung
10		Gabbro	Gyeongsangnam-do Hamyang
11		Diabase	Chungcheongnam-do Boryoung
12	Metamorphic rocks	Gneiss #1	Gangwon-do Hongcheon
13		Gneiss #2	Gangwon-do Hongcheon
14		Gneiss #3	Chungcheongnam-do Asan
15	Limestone	Chungcheongnam-do Danyang	
16	Sedimentary rocks	Sandstone	Gyeongsangnam-do Hamyang
17		Shale	Gyongsangnam-do Hamyang
18		Tuff	Jeollanam-do Yeosu
19		Dolomite	Unkown

**Table 2.** Properties of rock samples

No	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Shore Hardness	EQC (%)	QC (%)	CAI (HRC 55)
1	2.670	0.440	72	0.23	178	8	67.75	58.3	25.8	3.001
2	2.664	0.534	47	0.28	171	9	71.15	64.5	37.6	2.902
3	2.611	0.739	47	0.28	146	8	65.70	64.1	30.8	2.753
4	2.630	0.582	59	0.29	135	7	64.00	43	26.2	2.688
5	2.615	0.958	43	0.29	177	8	71.1	59.5	31	3.061
6	2.562	0.939	64	0.27	151	10	76.5	64	29.5	2.410
7	2.704	0.759	66	0.20	159	12	62.75	52.7	17.9	2.640
8	2.634	1.424	54	0.28	196	14	71.6	44.6	19.4	2.422
9	2.797	0.487	57	0.28	235	15	71.6	36.6	7.5	2.658
10	2.853	0.447	74	0.20	110	8	56.4	38.3	2.4	2.625
11	3.047	0.023	67	0.30	235	14	68.6	39.4	2.2	2.265
12	2.746	0.206	64	0.18	146	9	66.05	58.4	50.6	3.051
13	2.771	0.204	62	0.26	167	11	67.70	53.1	25.9	2.639
14	2.797	0.208	64	0.20	66	13	62	52.2	29.5	2.708
15	2.831	0.478	68	0.21	127	7	27.3	6.6	0	0.690
16	2.679	0.525	51	0.28	163	17	44.8	47.3	27.4	2.208
17	2.727	2.236	24	0.20	125	9	32.8	30.4	24.5	1.286
18	2.720	0.898	77	0.22	116	18	64.3	70.7	47.9	2.683
19	2.837	0.342	68	0.31	124	9	39.3	5.9	0	0.982

먼저 19개 암종에 대하여 CAI와 단축압축강도, 인장강도, 탄성계수, 포아송비, 공극률과의 관계를 도시하면 Fig. 3 ~ Fig. 7과 같고 CAI와 단축압축강도와의 상관계수  $R^2$ 값은 0.0489, 인장강도와는 0.009, 탄성계수와는 0.0072, 포아송비와는 0.00005, 공극률과는 0.0509를 가지므로 낮은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 쇼어 경도는 암석 표면의 경도를 측정하는 시험법 중

하나로서 암석을 구성하는 광물의 평균 경도를 측정 결과로 제시한다. CAI와 쇼어 경도는 Fig. 8 및 식 (3)과 같은 관계를 갖는 것으로 분석되었다.

$$CAI = 0.0417 \times H_s + 0.1221 \quad (3)$$

$$R^2 = 0.7462$$

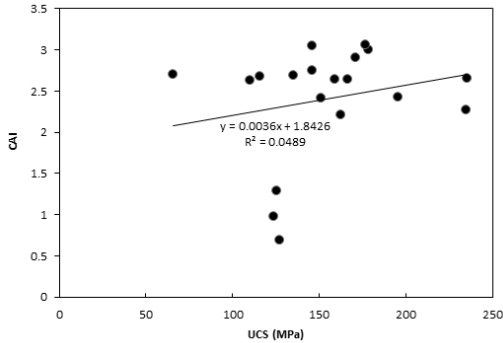


Fig. 3. Relationship between uniaxial compressive strength (UCS) and CAI

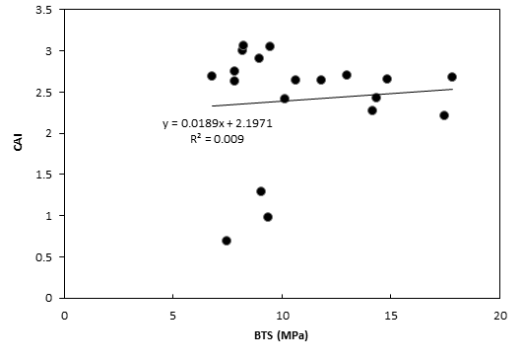


Fig. 4. Relationship between indirect tensile strength (BTS) and CAI

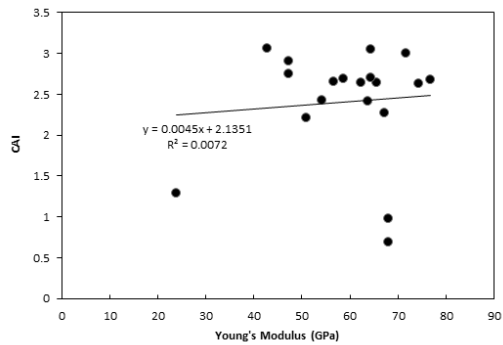


Fig. 5. Relationship between Young's modulus and CAI

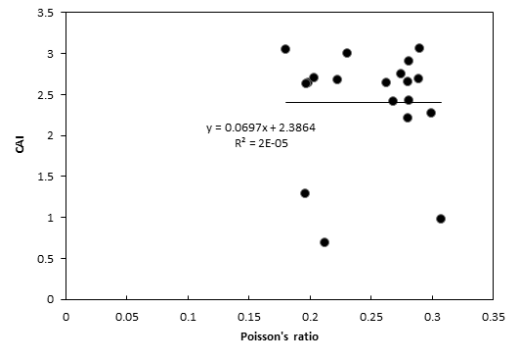


Fig. 6. Relationship between Poisson's ratio and CAI

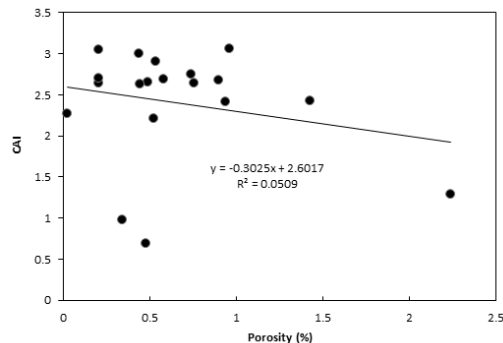


Fig. 7. Relationship between porosity and CAI

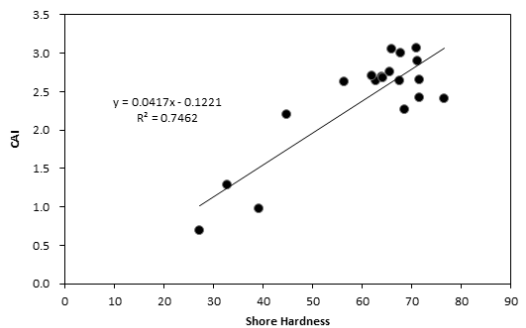


Fig. 8. Relationship between shore hardness and CAI

여기서, CAI는 세르샤 마모 지수이고  $H_s$ 는 쇼어 경도이다. 상관계수는 0.7462로 세르샤 마모 지수와 쇼어 경도는 비교적 높은 상관성을 갖는다고 할 수 있다. 이 시험 결과로부터 암석을 구성하는 광물 조성특성이 암석입자의 결합 특성보다 마모도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 조사되었다.

**3.2 광물 함량의 영향**

CAI값과 광물 함량의 상관관계를 알아내기 위하여 XRD 분석방법을 사용하여 광물 함량비를 구하였다. 석영은 암석 절삭 장비 마모에 큰 영향을 미치는 것으로 이미 알려져 있으며, 석영 외 다른 광물도 장비 마모에 기여하는 부분이 있으므로, 암석에 포함된 모든 광물의 함량비를 구하고 해당 광물의 석영에 대한 상대 경도를 구한 후 함량비로 가중평균을 구하면 등가석영함량을 구할 수 있다. 등가석영함량을 구하기 위해서는 암석을 구성하는 각 광물의 Rosiwal 경도를 알아야 하는데 Thuro and Plinninger (2003)의 회귀식을 이용하여 모오스 경도로부터 Rosiwal 경도를 구하였다. 이 관계식을 나타내면 식 (4)와 같다.

$$H_r = e^{\frac{H_m - 2.12}{1.05}} \tag{4}$$

여기서,  $H_r$ 은 Rosiwal 경도,  $H_m$ 은 모오스 경도를 나타낸다.

식 (4)를 이용하여 암석에 포함된 각 광물의 함량비 ( $A_i$ )를 석영의 Rosiwall 경도에 대한 비와 곱하여 식 (5)

와 같이 상대 석영 함량(relative quartz content, RQC)을 구한다. 이 때 석영의 모오스경도는 7이므로 식 (4)로부터 Rosiwal경도는 약 104.3이 된다. 이렇게 구한 상대 석영함량의 합으로 식 (6)과 같이 암석의 등가 석영 함량을 구하게 된다.

$$RQC_i = A_i \times \frac{H_{(r)_i}}{104.3} \tag{5}$$

$$EQC = \sum_{i=1}^n RQC_i \tag{6}$$

여기서  $RQC_i$ 는 상대 석영 함량(relative quartz content, %),  $A_i$ 는 광물의 함량(%),  $H_{(r)}$ 는 광물의 Rosiwal 경도이다.

이렇게 구한 석영 함량, 등가 석영 함량과 CAI값의 관계를 구해보고자 하였다. Fig. 9와 같이 암석의 CAI와 석영 함량은 상관계수  $R^2$  0.0955으로 낮은 상관관계를 보였지만 등가 석영 함량은 Fig. 10처럼 상관계수  $R^2$ 은 0.7425으로 비교적 높은 상관관계를 보였다. 이는 암석을 구성하는 광물 중 석영의 영향만을 고려하는 것보다 전체 광물의 경도를 복합적으로 고려해야 암석의 마모도를 나타내는데 적합하다는 것을 보여준다.

광물의 마모도는 광물의 특성과 입자간의 결합력의 함수로 나타낼 수 있는데 본 연구에서는 등가석영함량을 광물의 대표 특성으로, 단축압축강도를 입자간 결합력을 나타내는 대표 특성으로 하여 식 (7)과 식 (8)과 같이 CAI값을 예측하는 두 가지 모델의 회귀식을 만들었고 이들의 계수 a, b, c 값을 Table 3에 정리하였다.

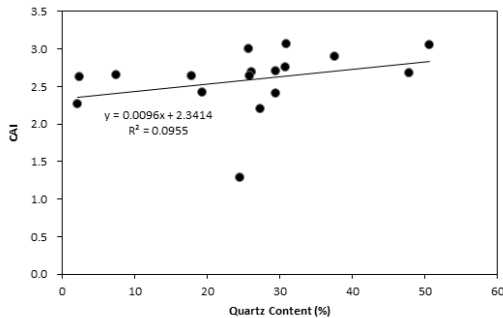


Fig. 9. Effect of quartz content on CAI

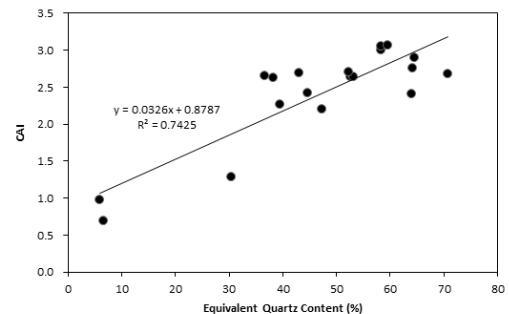


Fig. 10. Effect of equivalent quartz content on CAI

Table 3. Regression coefficient of Model 1 and Model 2

Type	a	b	c	R <sup>2</sup>
Model 1	0.03257	0.00524	0.07186	0.75
Model 2	0.25739	0.49209	0.07410	0.80

Table 3의 계수들은 3차원 회귀분석을 통하여 구한 값이며 OriginLab®의 통계 프로그램인 OriginPro 8.6의 3D nonlinear surface fitting function을 사용하였다.

$$\text{Model 1 : } CAI = a \times [EQC] + b \times [UCS] + c \quad (7)$$

$$\text{Model 2 : } CAI = a \times [EQC]^b \times [UCS]^c \quad (8)$$

여기서, CAI는 Cerchar 마모도 지수, EQC는 등가석영함량, UCS는 암석의 단축압축강도이다.

Model 1의 회귀식으로 부터 얻은 CAI값과 실제 시험으로 얻은 CAI값의 그래프는 Fig. 11, Model 2와의 그래프는 Fig. 12와 같다. Model 1로 구한 회귀식의 상관계수 R<sup>2</sup>는 0.75이고 Model 2로 구한 회귀식의 상관계수 R<sup>2</sup>는 0.80이었다. 암석의 마모도를 나타내는 데에는 광물의 특성이나 입자의 결합상태 두 가지를 모두 고려한 식의 상관관계가 각각의 특징과의 상관관계보다 더 높게 나타났다.

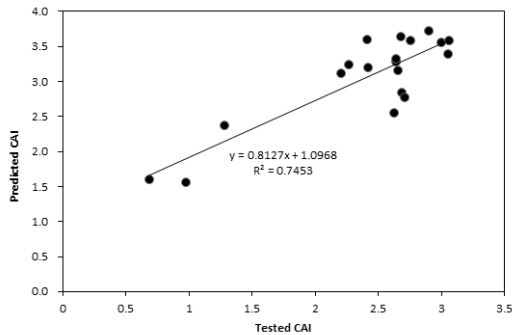


Fig. 11. Relationship between tested CAI and predicted CAI on Model 1

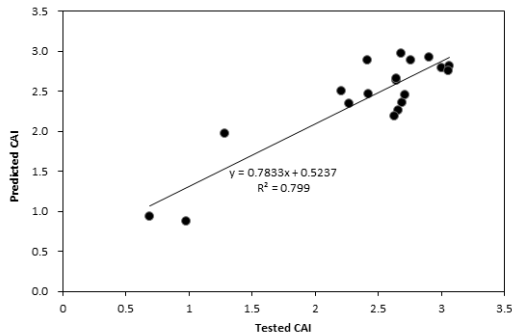


Fig. 12. Relationship between tested CAI and predicted CAI on Model 2

### 3.3 핀 경도의 영향

본 실험에서는 HRC 40, 45, 50, 55, 60의 핀으로 19종에 암중에 대하여 세르샤 마모 시험을 수행하였고 핀의 강도 증가에 따라 CAI값이 선형적으로 감소하는 것을 확인하였다. 그 결과는 Table 4와 Fig. 13에서 보는 바와 같다. 이 결과로부터 Fig. 14와 같이 낮은 CAI값을 갖는 시료와 높은 CAI값을 갖는 시료의 기울기 차이를 확인하였다. 따라서 HRC 40의 핀으로 시험한 결

Table 4. CAI values with respect to pin hardness

Sample No.	CAI				
	HRC 40	HRC 45	HRC 50	HRC 55	HRC 60
#1	3.396	3.122	3.024	3.001	2.601
#2	3.506	3.427	3.294	2.902	2.762
#3	3.416	3.395	2.854	2.753	2.617
#4	3.691	3.138	2.917	2.688	2.566
#5	3.547	3.219	2.931	3.061	2.337
#6	3.153	2.850	2.512	2.410	2.137
#7	3.665	3.288	3.457	2.640	1.882
#8	3.611	3.304	2.937	2.422	2.038
#9	3.235	2.974	2.820	2.658	2.175
#10	3.609	3.701	3.404	2.625	1.803
#11	2.824	2.578	2.362	2.265	1.902
#12	3.878	3.351	3.397	3.051	2.477
#13	3.238	3.261	3.405	2.639	2.359
#14	3.367	3.103	3.347	2.708	2.647
#15	0.833	0.991	0.821	0.690	0.656
#16	3.894	3.440	3.248	2.208	1.852
#17	1.364	1.269	1.307	1.286	1.052
#18	3.518	3.271	3.156	2.683	2.465
#19	1.340	1.570	1.327	0.982	0.839

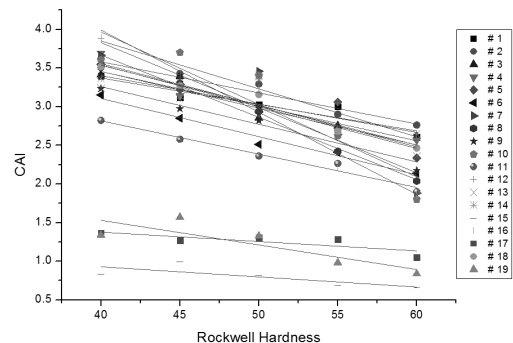


Fig. 13. Relationship between Pin hardness and CAI

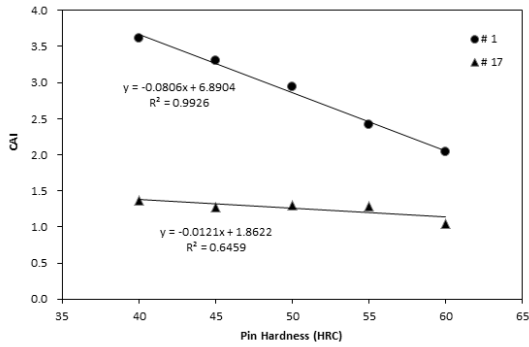


Fig. 14. Relationship between pin hardness and CAI for sample #1, #17

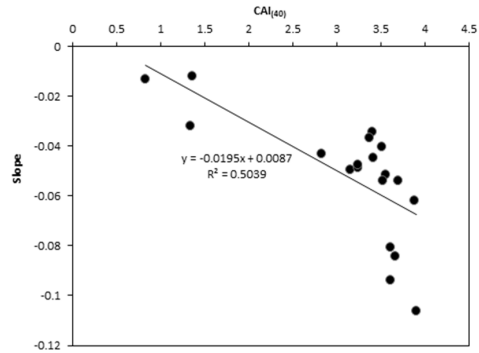


Fig. 15. Relationship between CAI<sub>(40)</sub> and Slope

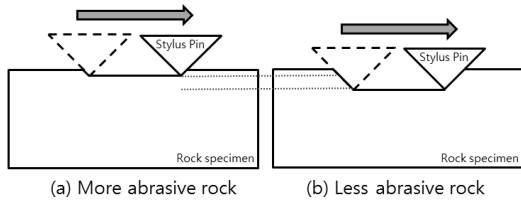


Fig. 16. Initial penetration of an indenter

과(CAI<sub>(40)</sub>)와 기울기에 대한 그래프를 그려보면 Fig. 15와 같다. 이 결과로부터 CAI<sub>(40)</sub> 값이 높을수록 기울기의 절대값이 더 증가하는 결과를 볼 수 있다. 이는 높은 마모도를 갖는 암석에서, 즉 높은 CAI를 갖는 암석에서는 핀의 경도가 커질수록 높은 감소율로 CAI가 감소함을 의미한다.

또 낮은 마모도를 갖는 시료 #13(Hongcheon gneiss), #16(Hamyang sandstone), #18(Yeosu tuff)에서는 핀의 경도에 따른 CAI값의 변화가 작은 것을 볼 수 있다. Fig. 16처럼 암석의 마모도 차이에 따라 초기 70 N의 수직하중으로 인한 압입깊이의 차이가 발생되는데 낮은 마모도를 갖는 암석이 더 많이 압입된다. 이로 인하여 핀 끝부분의 표면과 암석이 접촉하는 면적이 넓어져 광물로 인한 마모의 영향이 분산되어 핀의 경도가 암석의 CAI에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다. 따라서 높은 마모도를 갖는 암석의 CAI는 핀의 경도에 더 민감하게 감소하므로 마모도가 높은 암석에 대하여 세르샤 마모 시험을 수행 할 경우 일정한 경도를 갖는 핀의 선택이 중요한 것으로 생각된다.

#### 4. 수치해석적 연구

##### 4.1 수치해석 조건

본 연구에서는 ANSYS사에서 개발한 상용 수치해석 소프트웨어 프로그램인 Autodyn-3D를 사용하였다. 이 프로그램은 유한 요소법을 이용하여 동역학 문제를 해석을 위한 프로그램으로 비선형을 포함한 동역학, 접촉 문제, 충돌 및 관통 문제의 해석에 널리 사용되고 있다. (Century Dynamics, 2003)

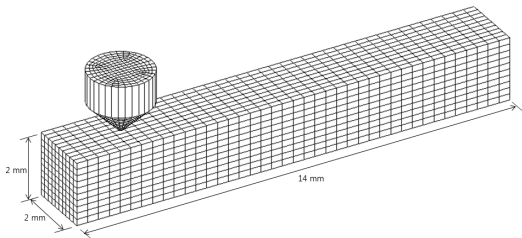
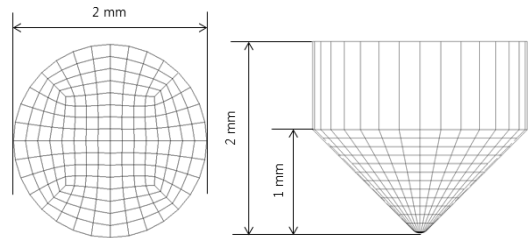
수치해석 연구를 진행함에 있어 스타일러스 핀은 Autodyn에서 제공하는 재료 라이브러리 중 AISI (American Iron and Steel Institute) 표준 금속 중 하나인 Steel 4340 합금강을 사용하였고 강도함수와 파괴함수는 모두 Johnson Cook model(Johnson and Cook, 1985)을 사용하였다. 재료의 물성과 관계된 상수 A, B, C, n, m, D<sub>1</sub> ~ D<sub>5</sub>는 Autodyn의 라이브러리에 있는 Steel 4340의 기본 값을 사용하였다(Century Dynamics, 2003). 암석의 물성은 실제 황동화강암의 실내시험 결과를 사용하여 입력하였고 Cho et al.(2010)의 연구에서 사용된 암석의 모델과 같이 linear equation of state를 적용하였으며 강도 모델은 Stassi-hardening Drucker-Prager을 선택하여 암석의 탄소성거동을 모사하였다. 또 파괴 모델은 주응력/주변형률 모델을 선정하여 암석의 파괴를 정의하였다. 입력된 변수들 중 압축 및 인장의 항복강도는 압축강도, 인장강도의 90%로 입력하였고 기타 다른 입력변수들은 Table 5와 같다.

수치해석에서 사용한 핀과 암석은 실제 시험에서와 같이 스타일러스 핀은 고정되어 있고 암석이 수평으로 움직이며 이동하도록 구성하였다. 핀과 암석의 모델을 실제 크기와 동일하게 생성하여 모사하기에는 계산 효율성이 떨어지는 문제가 있다. 실제 세르샤 마모 시험



**Table 5.** Input parameters for Hwangdeung Granite and Steel 4340

Hwangdeung Granite		Steel 4340	
Properties	Value	Properties	Value
Density ( $\text{g/cm}^3$ )	2.65	Density ( $\text{g/cm}^3$ )	7.83
Bulk modulus (GPa)	26	Bulk modulus (K, GPa)	159.0
Shear modulus (GPa)	23.7	Shear modulus (G, GPa)	818.0
Pressure hardening type	Stassi hardening	Yield stress (A, MPa)	792
Yield stress in tensile uniaxial strain (MPa)	8.31	Specific heat (J/kgK)	477
Yield stress in compressive uniaxial strain (MPa)	188	Melting temperature (K)	1793
Principal tensile failure stress (MPa)	9.24	Hardening constant (B, MPa)	510
Max. princ. stress difference / 2 (MPa)	4.62	Hardening exponent (n)	0.26
Principal tensile failure strain	$1.73 \times 10^{-3}$	Thermal softening exponent (m)	1.03
Max. princ. strain difference / 2	$8.65 \times 10^{-4}$	Reference strain rate (R, 1/sec)	1
Crack softening	Yes	Strain rate correction	1st order
Fracture energy ( $\text{J/m}^2$ )	23.45	D1	0.05
Flow rule	Bulking (Associative)	D2	3.44
Stochastic failure	No	D3	-2.12
-	-	D4	0.002
-	-	D5	0.61

**Fig. 17.** Entire model of numerical analysis**Fig. 18.** Specification of pin model

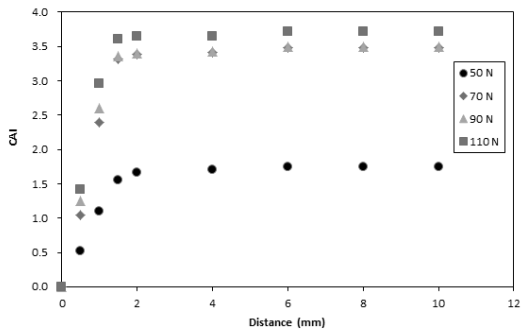
에서 핀이 마모된 길이(wear flat)는 최대 2 mm를 넘지 않으므로 핀의 끝 부분으로 축소하여 시험을 수행하였다. 높이와 직경이 각각 2 mm이고 팁의 형상이 90°의 각을 갖는 원뿔형 핀을 사용하였고 핀의 끝부분은 반경이 0.05 mm인 구 모양이 되도록 모델을 생성하였다. 요소망은 원주 방향으로 최대 32개로 분할하였고 핀의 끝부분으로부터는 12개로 분할하여 총 3264개로 구성되었다. 암석의 크기는 2 mm × 2 mm × 14 mm이고 요소망은 10 × 10 × 40개로 4000개 이다(Fig. 17, Fig. 18). 핀의 끝부분은 암석의 끝부분에서 2 mm에 위치시켰고 암석이 10 mm를 이동할 때까지 해석을 수행하였다.

#### 4.2 수치해석 결과 및 분석

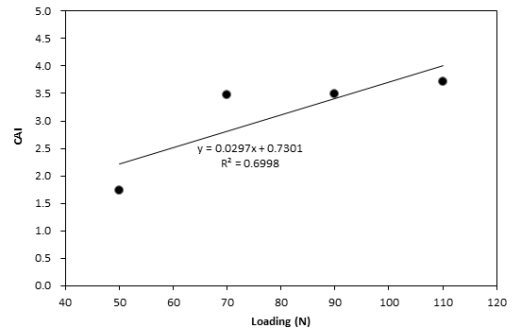
실제 세르샤 마모 시험에서 스타일러스 핀을 10 mm 이동하여 결정되는 CAI 값은 이동 초기에 급격한 변형을 보이는 것으로 알려졌는데(AI-Ameen & Waller, 1994) 수치해석적 연구를 통한 굽힘 거리에 따른 핀의 마모를 관찰 한 결과 Table 6, Fig. 19와 같이 나타났다. 50 ~ 110 N의 수직하중을 사용한 결과 모두 굽힘 거리가 2 mm 이하인 구간에서 CAI의 급격한 증가를 보이고 그 이후에는 CAI값의 변화가 거의 없었다. 50 N의 하중에서 최종 CAI값의 95%에 이르는 지점은 1.99 mm 이었고 70 N의 하중에서는 1.52 mm, 90 N의 하중에서는 1.45 mm, 110 N의 하중에서는 1.43 mm이었다. 이 결과를 통하여 높은 하중에서 CAI가 더 급격하게 수렴함

**Table 6.** Result of CAI at different normal loads and scratching distances

Distance (mm)	Normal load (N)			
	50	70	90	110
0.0	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5	0.523	1.045	1.248	1.417
1.0	1.096	2.391	2.599	2.956
1.5	1.556	3.309	3.350	3.607
2.0	1.657	3.390	3.402	3.646
4.0	1.707	3.410	3.493	3.646
6.0	1.742	3.481	3.493	3.721
8.0	1.742	3.481	3.493	3.721
10.0	1.742	3.481	3.493	3.721



**Fig. 19.** Effect on testing distance on CAI



**Fig. 20.** Effect of loading on CAI

을 확인하였다. 또 높은 하중에서 더 큰 CAI 값을 보이는데 이 결과는 Fig. 20에 나타난 바와 같고 하중과 CAI의 상관계수  $R^2$  는 0.70인 것으로 분석되었다.

**5. 결론**

본 연구에서는 국내 19종 암석에 대하여 세르샤 마모 시험을 수행하였고 시험 결과에 영향을 미치는 인자들을 찾기 위하여 암석의 기본물성 시험 및 광물 함량 분석을 실시하여 회귀 분석을 통해 상관관계를 분석하였다. 핀의 경도가 미치는 영향을 분석하기 위하여 로크웰 경도가 40 ~ 60 인 핀을 대상으로 시험을 수행하였다. 또 수치해석적 기법을 이용하여 실제 시험에서 확인하기 힘든 굽힘 길이와 수직 하중의 영향을 파악하였다.

1. 국내 19종에 암석에 대해 로크웰 경도 55의 핀으로 세르샤 마모 시험을 수행한 결과 얻어진 세르샤 마모 지수(CAI)값과 암석의 기본물성과의 상관관계를 구하였다. 그 결과 단축압축강도, 인장강도, 탄성계

수, 포아송비, 공극률과는 상관계수( $R^2$ ) 값이 모두 0.1이하로 의미 있는 상관관계를 찾을 수 없었다. 하지만 암석의 표면경도를 나타내는 쇼어 경도와 CAI와는 상관계수( $R^2$ ) 값은 0.7462로 암석의 표면경도가 커질수록 CAI 값이 선형으로 증가함을 알 수 있었다.

2. CAI와 암석의 석영 함량, 등가 석영 함량과의 상관관계를 분석한 결과, 석영 함량이 CAI값에 미치는 영향보다 등가 석영 함량이 CAI에 미치는 영향이 더 큼을 확인하였다. 따라서 암석을 구성하는 광물의 전체적인 경도를 고려하여야 보다 합리적으로 암석의 마모도를 산정할 수 있을 것으로 판단되었다.
3. 커터의 마모와 관련 있는 인자들 중에 구성 광물의 특성이 입자 결합 특성보다 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또 광물 특성(등가 석영 함량)과 입자 결합 특성(단축압축강도)의 복합적인 함수로 CAI값의 예측모델을 제시할 수 있었다.
4. 핀의 경도가 커질수록 CAI값이 선형적으로 작아짐을 확인하였으며 낮은 CAI값을 갖는 암석(마모도가

작은 암석)에서는 핀의 경도에 따른 차이가 크지 않지만 높은 CAI값을 갖는 암석(마모도가 큰 암석)에서는 핀의 경도가 커질수록 CAI값이 감소하는 비율이 큰 것으로 나타났다. 따라서 마모도가 큰 암석에서는 핀의 경도에 따라 시험결과가 크게 바뀔 수 있기 때문에 시험에 사용되는 핀의 경도를 합리적으로 선택하여야 할 것으로 판단되었다.

5. 수치해석 결과 시험 초기 굽힘 거리 2 mm 이전에 CAI는 급격히 높아져 수렴함을 확인하였으며 나머지 굽힘 거리 8 mm에서는 CAI의 변화가 거의 없었다. 하중이 증가할수록 CAI값이 증가하는 속도가 커지고 10 mm를 이동했을 때의 CAI값도 높아짐을 알 수 있었다.
6. 세르샤 마모 시험법은 2010년 ASTM시험법으로 제안된 바 있다. 이 시험법의 국내 적용에 관한 연구는 이루어진 바 없으며 국내 암종 및 암반특성을 고려하여 그대로 적용하는데 문제점이 없는 지 검토되어야 할 것이다. 특히 스타일러스 핀의 경도 규격, 핀의 팁 형상 규격등은 광물 조성 특성에 의해 영향을 받은 인자이므로 국내 암종을 고려한 적용성 연구가 이루어져야 할 것이다.

## 감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업인 “TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM 터널의 최적건설기술(과제번호: 10기술혁신E09) - 1세부과제: TBM 커터헤드 최적 설계기술 및 고성능 디스크커터 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

## 참고문헌

1. Jung, H.Y., Jeon, S., Cho, J.W., 2012, A study on punch penetration test for performance estimation of tunnel boring machine, Tunnel and underground space, Vol. 22, No. 2, pp. 144-156.
2. Al-Ameen, S.I., & Waller, M.D., 1994, The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar abrasive index, Engineering Geology, Vol. 36, No. 3-4, pp. 293-301.
3. ASTM D-7625-10, 2010, Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the Cerchar method
4. Atkinson, T., Cassapi, V., & Singh, R., 1986, Assessment of abrasive wear resistance potential in rock excavation machinery, Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 151-163.
5. Century Dynamics Inc., 2003, Autodyn Theory Manual, Concord, California
6. Cho, J.W., Jeon, S., Yu, S.H., Chang, S.H., 2010, Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 25, No. 3, pp. 230-244.
7. Johnson, G.R., Cook, W.H., 1985, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 21, No. 1, pp. 31-48.
8. Rosiwal, A., 1896 Neue Untersuchungsergebnisse über die Härte von Mineralien und Gesteinen. Verhandlg d kk geol R-A. Wien, pp. 475-491.
9. Rostami, J., Ozdemir, L., Nilsen, B., 1996. Comparison between CSM and NTH hard rock TBM performance prediction models, Proceedings of Annual Technical Meeting of the Institute of Shaft Drilling and Technology, pp. 11.
10. Thuro, K., Plinninger, R.J., 2003, Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting: rock parameters for excavatability, Proceedings of ISRM International Congress, Vol. 2, pp. 1227-1234.
11. West, G., 1981, A review of rock abrasiveness testing for tunnelling, Proceedings of ISRM International Symposium, pp. 585-594.
12. West, G., 1989, Rock abrasiveness testing for tunnelling, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 26, No. 2, pp. 151-160.

1. Jung, H.Y., Jeon, S., Cho, J.W., 2012, A study on punch penetration test for performance estimation of tunnel

**이수득**



2010년 서울대학교 공과대학 에너지자  
원공학과 공학사

Tel: 02-880-7230  
E-mail: ics1961@snu.ac.kr  
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스  
템공학부 석사과정

**정호영**



2008년 서울대학교 공과대학 지구환경  
시스템공학부 공학사  
2010년 서울대학교 공과대학 에너지시  
스템공학부 석사

Tel: 02-880-7230  
E-mail: hyjung04@snu.ac.kr  
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스  
템공학부 박사과정

**전석원**



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
1991년 (미)캘리포니아 주립대학 대학원  
공학석사  
1996년 (미)아리조나 주립대학 공학박사

Tel: 02-880-8807  
E-mail: sjeon@snu.ac.kr  
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스  
템공학부 교수