

## 암석을 대상으로 시행하는 Schmidt Hammer 타격법의 새로운 제안 (II)

민덕기<sup>1)\*</sup>, 문종규<sup>2)</sup>, 이상일<sup>3)</sup>

### Suggestions of a New Method for Schmidt Hammer Blowing and Data Analysis on Rocks (II)

Tuk-Ki, Min, Jong-Kyu Moon, Sang-II Lee

**Abstract** As an indirect method, Schmidt hammer test has been employed to investigate correlation between uniaxial compressive strengths and blow values. To conduct the experiment, researchers have examined 11 types (1,417 blocks) of rock, which include igneous, metamorphic and sedimentary rocks in Korea. Every kind of rocks shows different blow behaviors in which correlations of rocks have been analyzed, thus leading to results in new formulas for strength predictions. Cross-check for reliability demonstrates high confidence. Newly proposed test method is highly valued for future research on Korean rocks.

**Key words** Schmidt hammer, Igneous rock, Sedimentary rock, Correlation, Confidence

**초 록** 본 연구에서는 Schmidt hammer 시험법을 적용하여 국내 공사현장에서 출현 빈도가 높은 화성암, 변성암 및 퇴적암 11종을 대상으로 일축압축강도와 타격값의 상관성 해석을 시도하였다. 암종에 따라 타격거동이 각각 다르게 나타난 암석의 상관성 해석을 거동별로 시행하여 6개의 경험식을 제안하였다. 이 식들의 신뢰성 분석을 교차검정으로 시행한 바 새로이 제안된 시험방법은 국내 암석을 대상으로 시행한 결과의 신뢰도가 높아 활용 가치가 높다고 할 수 있다.

**핵심어** 슈미트 해머, 화성암, 퇴적암, 상관성, 신뢰성

#### 1. 서 론

Schmidt hammer 타격법은 암반의 물성을 간접추정하는 간편하고 신속하며 저렴한 방법으로 실내와 현장에서 두루 활용할 수 있는 방법이다. 건설공사의 설계, 시공과정에서 대상암반의 성질을 필요시마다 간편히 활용할 수 있기 때문에 타 간접방법에 비해서 범용성도 매우 높은 편이다. 또한 추정 물성치의 신뢰성도 타 방법에 비해 높은 편(민덕기 등, 2008)이다.

그러나 이 시험은 ASTM(D 5873-05)과 ISRM (2009)의 규정에 준하여 시행함이 보편적인 경향이다. 이들 두 기관의 시험방법은 대동소이하며 단일 타격법을 위

주로 제반 사항을 규정하고 있다. 여러 연구자들은 이 방법을 기초로 하여 다양한 경험식들을 발표하였다. 그러나 대상 암석도 발표자의 연구의 편이에 따라 여러 암석이 혼재한 모집단을 대상으로 하여 나라마다 다른 지질학적 특성이나 연구방법의 특성들로 인하여 보편적으로 쓰이기에는 현실적으로 적합하지 않는 등 신뢰도 높은 경험식으로 활용할 수 없는 실정이다.

필자들은 전국에 산재한 암석 중에서 건설공사 현장의 출토빈도가 높은 순으로 암석을 분류하여 지질학적 생성배경을 기초로 11개 암종을 한국지질도(한국자원소, 1995)에 표시된 곳에서 시료를 채취하여 각종 암석 시험을 시행하였다. 각종암 150개 블록을 대상으로 연속 타격법으로, 1개 블록에 최소 20개 격자점을 타격하여 참값에 가까운 값(최근접값)을 도출하였다. 이때 Schmidt hammer 타격으로 암석의 물성을 간접추정하기 위하여서는 연속 타격법이 최적의 방법이라는 사실을 확인하였고 타격값의 자료 처리방법도 새로이 제안하게 되어 이를 제1편(민덕기 등, 2009)에 수록하였다.

많은 연구자들은 각종 암석을 분류하지 않은 상태로

<sup>1)</sup> 울산대학교 공과대학 건설환경공학부 교수

<sup>2)</sup> 정희원, 동명기술공단(주)부사장, 공학박사

<sup>3)</sup> 정희원, 한국농어촌공사 감사실, 박사수료

\* 교신저자 : tkmin@ulsan.ac.kr

접수일 : 2009년 9월 17일

심사 완료일 : 2009년 10월 6일

게재 확정일 : 2009년 10월 19일

타격 시험값의 경험식을 보고하였으나 본 연구에서는 이들 암종의 타격저동 특성을 규명하고 이에 따라 각각 상이한 거동을 하는 암종별로 타격해석을 시행하였다. 이는 국내의 공사실무에 활용이 가능하도록 신뢰성을 높이기 위하여 각종암 1,417개 블럭을 시험 대상암으로 선정하였다. 이들 암석을 대상으로 제1편에서 얻은 결론을 적용하여 국내에서 출토되는 11개 암종에 대하여 일축압축강도와 Schmidt hammer 타격값의 상관성 해석을 시행하여 그 결과를 다시 신뢰성 검정을 하였다. 또한 상관성 해석을 시행한 결과를 또 다른 방법의 신뢰도 검정을 시행하여 교차검정의 결과도 매우 높은 신뢰성을 보여 주었다. 이들의 과정을 본 연구의 진행과정으로 기술하여 제2편으로 수록하게 되었다.

## 2. 연구의 목적

지금까지 많은 연구자들이 암석의 역학적 성질 규명을 위하여 쉽고, 빠르고 저렴하게 시험하기 위하여 간접방법을 연구하여 왔다. 또한 시추 코어의 부족, 코어의 성형이 불가능한 경우에 설계 및 시공기술자는 부득이 간접시험법을 채용하지 않을 수 없는 경우에도 매우 유용하게 활용될 수 있었다. 그 중에는 점하중시험, 탄성파속도시험, Schmidt hammer 타격시험, 마모율시험 (민덕기 등, 2007), 압열인장시험(민덕기 등, 2008, 2009)

등을 활용하여 많은 경험식을 보고하였다. 이들 간접시험법은 모두 시험특성과 해석상의 특성을 지니고 있으며 그 결과에서도 참값의 근접성에 한계를 나타내는 경우도 있었다.

외국 연구자들의 경험식들은 그 해당국가의 암석을 대상으로 시험한 결과이므로 국내 암석에 적용하기에는 무리가 많음을 알게 되었다. 같은 세일이라도 나라마다 지질학적 퇴적환경이 다르고 상재하중이 다르기 때문에 물리적, 역학적 및 화학적 특성이 다른 세일로 생성되었기 때문일 것이다(표 1). 국내 세일에 대한 연구에서 이 같은 사실을 알게 되었고 또한 이들이 제시한 경험식들로 추정된 결과는 시험결과와 매우 다른값을 나타내기도 했다. 국내 연구자들의 경험식은 실험대상 암석의 지질학적 생성배경에 따른 강도발현 특성, 모집단의 규모, 동일 암종의 전국적 분포를 고려하지 않은 범용 경험식을 도출하였다. 그 결과 통계적 요건의 결여로 인한 범용성의 한계를 극복하지 못하게 되었다. 국내의 연구자들의 경험식들을 검토하여 보면 모집단 규모의 빈약, 실험자료의 사전 통계적 검정의 소홀, 암석의 지질학적 생성원인에 대한 고찰의 부족, 도출된 결과에 대한 검정의 소홀 등으로 실용성에 대한 신뢰성의 부족을 초래하였다.

필자들은 현장공사에 임하면서 터널 막장, 풍화된 암반사면에서 급격한 암질의 변화, 불연속면의 예상외의

표 1. 세일의 물리지수

Shale name	Location	Age	UCS (MPa)	BRZ (MPa)	E·Modulus (GPa)	G <sub>s</sub>	n (%)	Wab (%)	Reference
Eagle Ford	Texas USA	Cretaceous	(2.07) 0.44~5.82	(0.93) 0.72~1.12				(16.0) 4.0~25.0	Hsu et. (2004)
Pierre	S.Dakoda USA	Cretaceous	0.5~10.0		0.14~1.00			18.0~29.0	Hanna et. (1991)
Queenston	Ontario Canada	Cretaceous	10.5~23.5	0.4~1.3	4.0~14.2	2.19~2.32	5.4~9.5	2.5~10.4	Dusseault et. (1998)
Shaftesbury	Vancouver Canada	Cretaceous	0.5~13.0		0~3.0			3.0~10.4	Hanna et. (1991)
Peace Canyon	Canada	Cretaceous	17.0~100.0		3.5~24.0			2.0~3.0	Hanna et. (1991)
Hawkesbury	Australia	Cretaceous	(47.5)	(4.38)	(7.00)				Hanna et. (1991)
Longyou	Zhejiang China		(36.8)	(1.35)	(5.44)			2.5~8.2	Guo et. (2004)
일본 중서부	Japan		65.0~110.0			2.30~2.70	2.9~55.0	0.2~6.1	kojima 등 (1989)
한국	전국	Cretaceous	(66.0) 30.0~102.0	(10.5) 8.0~13.0	(4.5) 2.0~7.0	밀도(2.73) 2.63~2.68	(2.62) 0.77~4.47		신희순 등 (2000)

복잡성 및 습윤, 용출상태로 긴급 대처가 필요할 시 기존 경험식들을 활용하였으나 당혹스런 결과를 초래한 적도 많았다. 이에 본 연구는 토목 공사 현장에서 출현 빈도가 높은 암석과, 전국에 산재한 암석을 대상으로 현업에 활용도가 높은 경험식을 도출하기 위하여 각종 암석별로 1,417개 블록을 대상으로 시험을 시행하였다. 즉 본 연구는 학문적인 기여 보다는 현장 실용성에 더 크게 무게를 두어 진행하였다. 이는 암반의 지질학적, 공학적 지식이 부족한 현장 기술자들이 암석을 구분할 수 있는 지식만으로 간단하고 쉽게 공사수행에 도움을 줄 목적으로 연구를 시행하게 되었다.

### 3. 시료채취

본 연구에서는 토목 공사의 대상으로 가장 출토비율이 빈번한 암들을 위주로 선별하여 실무에 활용이 쉽도록 배려하여 채취하였다. 퇴적암에 속하는 셰일, 사암, 이암, 역암, 석회석 및 응회암을, 화성암에 속하는 화강암, 안산암 및 유문암을, 변성암으로는 편마암과 혼펠스를 대상으로 선정하였다. 화강암 채취에서는 대보화강암, 불국사 화강암 및 엽리상 화강암을 출토 비율에 따라 고루 포함시켰다. 편마암도 화강 편마암, 흑운모 편마암, 엽리상 편마암을 출토 지역에 따라 포함시켰으며 지리산 복합체 편마암류도 빼놓지 않았다. 혼펠스는 셰일이 혼펠스화된 시료를 채취하였다.

시료는 한국지질도의 분포 기준으로 지역과 면적의 비례에 따라 지점을 선정하였다. 현지에서 Rock hammer와 Schmidt hammer 타격으로 개략적 강도 분포를 얻

두에 두고 시료를 선정하였다. 동일한 블록에서 생산된 시료로 일축압축시험 및 기타 물성시험을 시행하기 위하여 28~30 cm 길이의 NX 기준 코어가 최소한 30개 이상이 필요하기에 이를 확보하기 위하여 최소한 40×50×30 cm(약 160 kg/개)급의 블록이 필요하였다. 이들의 분포와 물리적 성질을 표 2에 요약하였으며 전국 105개 채취지점의 리스트는 생략하였다.

## 4. 실험

### 4.1 실험의 원칙

1편(민덕기 등, 2009)의 연구에서 내린 결론을 토대로 하여 우리나라에서 출토되는 각종 암석을 대상으로 본 연구에 임하였다. 이들 기준을 여기서 다시 요약하면 다음과 같다.

- 암석을 대상으로 시행하는 Schmidt hammer 타격법은 연속 타격법이 적합하다.
- 한 지점에 10회 연속 타격을 가한 후 1~5회값은 버리고 6~10값의 평균값을 대표값으로 사용하며, 노두 암석이나 블록에서는 최소 20cm 이상 떨어진 정삼각형 꼭지점 값의 평균값을 대표값으로 사용한다.
- Schmidt hammer는 타격 에너지가 큰 N-hammer (2.207 N\*m)가 적합하다.

### 4.2 일축압축시험

일축압축시험은 개별 블록에서 결함이 외양에 나타나지 않은 코어 3개씩 선별하여 이를 절단하여 3개/조로 시

표 2. 대상암석의 물리, 역학적 성질

암석군	암 석	시료수	강도범위	UCS(평균)	E	rt	Gs	Wa
퇴적암	셰일	211	18.5~266.5	97.5	46.5	2.664	2.755	2.69
	사암	166	15.3~250.7	101.3	47.5	2.657	2.730	2.45
	이암	49	13.8~92.5	52.6	25.3	2.638	2.797	4.26
	역암	15	24.5~97.8	50.6	23.8	2.592	2.717	4.29
	석회석	70	15.2~185.3	79.3	35.9	2.753		
화성암	응회암	57	13.0~115.7	48.7	25.1	2.672		
	화강암	321	10.1~168.0	87.0	21.8	2.698	2.709	0.85
	안산암	127	30.5~229.9	117.6	48.9	2.700	2.744	0.59
변성암	유문암	66	63.2~143.5	105.3	32.0	2.597	2.731	4.30
	편마암	260	24.7~163.0	95.0	8.4			
	혼펠스	75	46.5~342.2	199.2	77.1	2.715		
계		1,417						

※ 시료수:블록개수, UCS:일축압축강도(MPa), E:탄성계수(GPa), rt:단위중량(ton/m<sup>3</sup>), Wa:흡수율(%)

험을 시행하였다. 파괴 시험은 UTM-200 ton (MT200S, M & T Korea)을 사용하였으며 예상 파괴강도의 1/3, 2/3 점에서 재하, 재재하를 시행하여 3회 반복재하로 수행하였다. Spherical platen을 사용하여 편심을 방지하였고 모든 성과는 data logger를 통하여 storage computer에 수용하였다. 시험은 3개/조로 시행하여 여기서 도출된 값의 평균값을 해석에 적용하였다. 이 과정에서 ASTM (D 4543-08), ASTM (D 7012-07e1), ISRM (1979)의 규정에 준하여 코어를 가공하고 실험을 시행하였다. 모든 시료는 공기 건조상태의 것을 사용하였다.

4.3 Schmidt hammer 타격시험

선행 연구자들과 ASTM (D 5873-05), ISRM (2009)의 권장에 따라 NX 코어에 타격시험을 하기 위하여 층리면에 수직으로 코어 채취를 하였고 코어 양단면을 절단하여 평평하도록 연마하였다. 그 다음 NR형 Schmidt hammer로 측방향 타격을 하였으나 1회 타격에 거의 모든 시료가 파괴되어 50여개의 시험은 자료없이 시료를 버리게 되어 다시 V hold에 설치후 직경방향으로 타격을 실시했다. 그러나 약 40여개의 시료가 전부 1회 타격에 파괴되었다. 이는 시료 내부에 육안으로 판별이 어려운 흠결(층리 등의 불연속면)이 있었을 가능성도 있

고 또한 시료 부피가 타격 에너지를 수용하기엔 너무 적었기 때문에 판단이 되어 블럭을 대상으로 타격하는 시험방법으로 변경하여 철제좌대(H-beam: 350×350×12)를 제작하여 그 위에 블럭을 고정한 후 층리면에 수직으로 타격하였다. 즉 일축압축강도가 대략 80 MPa 이하의 암석은 블럭 시료에서만 시험이 가능하였다. 개별 블럭을 H-beam 좌대에 올려 양단을 click band로 고정시킨 후 중형 6 cm간격으로 grid를 표시한 후 표면을 평평하게 연마하고, 블럭의 층리, 엽리, 마 조직면 및 기타 불연속면과 좌대면이 평행하도록 안치된 상태에서 Schmidt hammer 타격시험을 시행하였다.

5. 시험자료의 검정

채취된 1,417개의 블럭에 대한 Schmidt hammer 타격시험을 시행하여 얻은 타격값의 자료가 해석대상으로 적합한지를 통계적으로 검정을 하였다. 이것은 이들 값의 표준편차와 변동계수가 적합한 범위 내에 있는지를 검정하여 자료해석에 임하려는 것이다.

시험대상 전체암석 1,417개의 자료가 통계적 타당성이 있는지를 개략적으로 판단하기 위하여 타격수와 빈도를 검토한 것이 그림 1(a)이다. 전체적 분포현상은 타

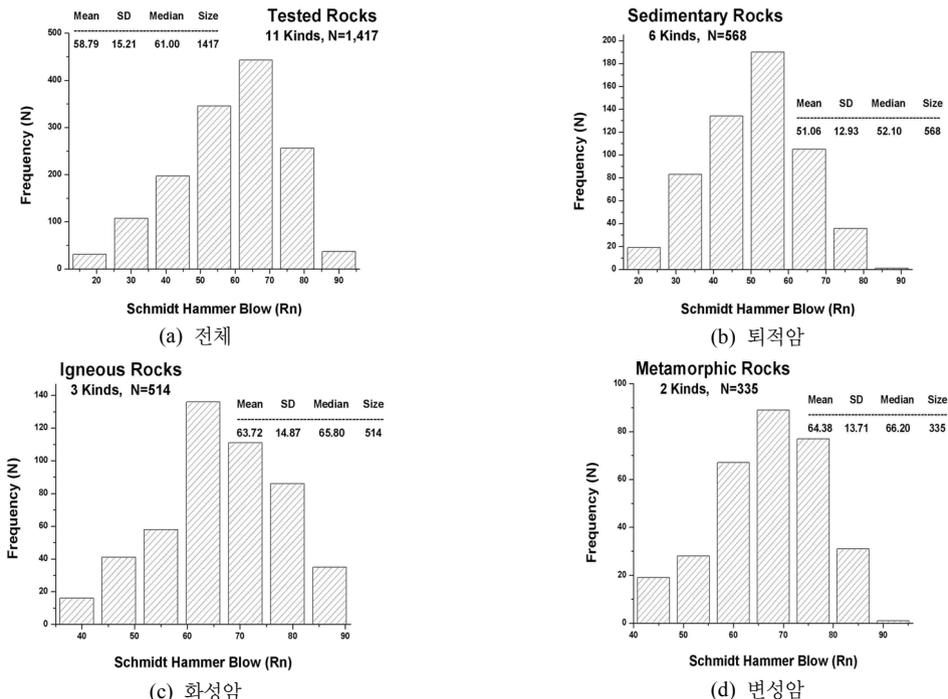


그림 1. 타격값의 분포

격수가 큰 쪽으로 약간 치우친 카이(chi)분포 양상을 나타내고 있다. 이는 Schmidt hammer 타격값의 특성으로 볼 수 있다. 또한 개별 그룹별로 같은 방법으로 검토한 것이 그림 1(b)의 퇴적암, 그림 1(c)의 화성암 및 그림 1(d)의 변성암의 타격수-빈도 분포도이다. 개별 그룹의 양상도 그림 1(a)의 전체 분포도와 유사한 양상을 나타내고 있다.

이들 분포양상의 통계자료를 요약한 것이 표 3이다. 각 그룹별 암석의 평균값과 중위값(median)의 차이도 크지는 않음을 알 수 있다. 퇴적암, 화성암 및 변성암의 표준편차와 변동계수는 서로 비슷한 값들이나 전체암에서 이들 값의 표준편차와 변동계수값이 다소 높게 나타난 것은 거동특성이 각각 다른 암석들의 집합체이기 때문으로 분산이 크게 나타났기 때문일 것이다. 따라서

개별 암석군으로 해석하는 것이 오차를 줄일 수 있는 방법이라 사료된다.

### 6. 타격값의 거동

퇴적암, 화성암 및 변성암의 자료를 타격값-일축압축강도의 좌표에 적점을 한 것이 그림 2(a)이다. 응력수준에 따라 강도발현의 경향이 각기 다른 암석들의 집합임을 알 수 있다. 여기서 이들을 분해하여 퇴적암, 화성암 및 변성암별로 각각 표현한 것이 그림 2(b), 그림 2(c) 및 그림 2(d)이다.

그림 2(b)에 속한 중생대 백악기 퇴적암 그룹에 속한 암석은 셰일, 사암, 이암, 역암, 석회석 및 응회암으로 568개의 시료로 구성되어 있다. 퇴적암 6개의 개별암석

표 3. 타격값의 통계자료

	시료수	Mean	Median	SD	CoV	비고
전체	1.417	58.79	61.00	15.21	0.26	11종
퇴적암	568	51.06	52.10	12.93	0.23	6
화성암	514	63.72	65.80	14.87	0.23	3
변성암	335	64.38	66.20	13.71	0.21	2

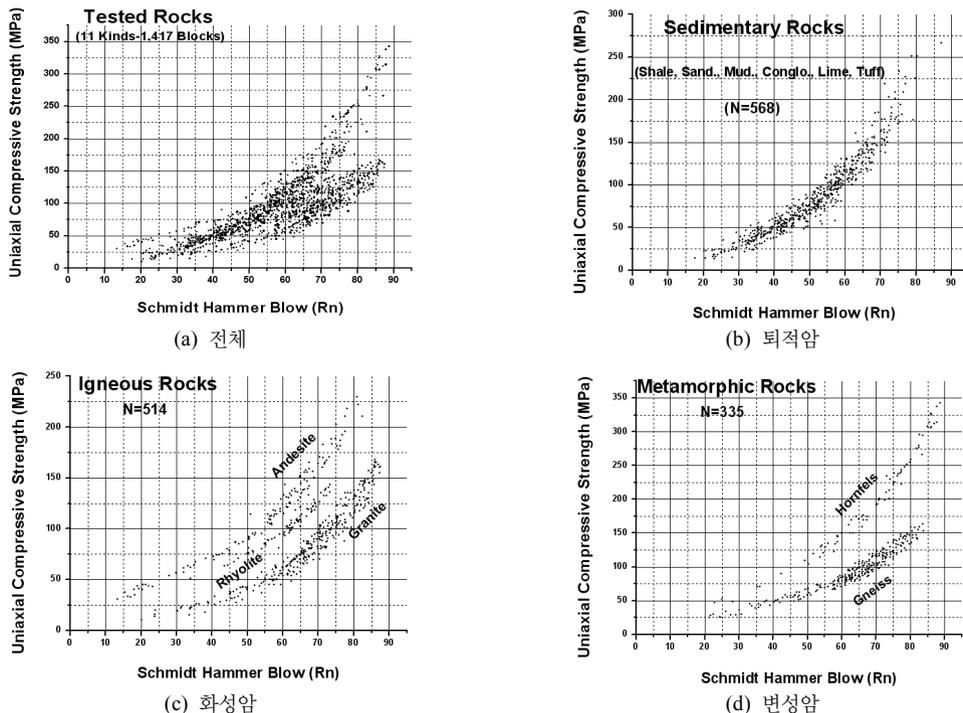


그림 2. 타격값의 거동분석

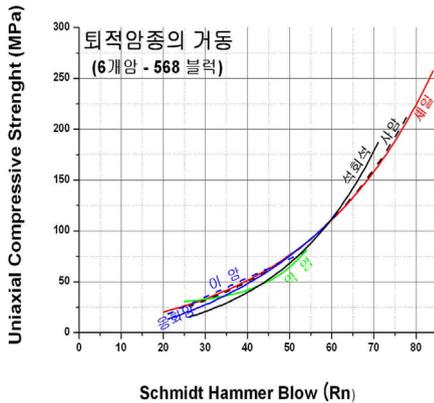


그림 3. 퇴적암종의 거동

의 타격값-일축압축강도 좌표에서 강도발현 거동이 동일하다는 사실을 알 수 있다. 이들 6개의 암석을 개별암별로 타격값-일축압축강도의 회귀분석을 시행해 본 결과, 세일과 사암은 상관곡선이 거의 일치하며 다른 암석의 곡선 이격도 미미하나 역암의 회귀분석 곡선이 약간의 이격이 보일 뿐 그림 2(b)의 전체적 경향에 차이는 거의 없었다. 이는 퇴적암에서는 타격값-일축압축강도의 거동은 동일 경향임을 알 수 있다. 이들의 거동특징을 그림 3에 나타내었다.

화성암 그룹의 그림 2(c)에서는 또 다른 3가지의 경향이 나타나고 있다. 즉 안산암, 유문암 및 화강암의 강도발현 거동이 각각 상이함을 알 수 있다.

변성암 그룹 그림 2(d)에서도 혼펠스와 편마암의 강도발현 거동이 다름을 볼 수 있다. 화성암의 3종과 변성암의 2종의 암석에서 강도발현 거동이 암석마다 각각 상이하게 표출되지만 퇴적암 그룹 6개 암종의 강도발현 거동이 같은 이유에 대하여 검토할 필요가 있다.

## 7. 강도발현의 기구

퇴적암의 근원암은 화성암, 변성암 및 개체가 또 다른 퇴적암일 것이다. 이들 근원암들은 풍화로 인해 모암에서의 분리, 지구조운동의 강력한 힘에 의한 파쇄, 풍수압에 의한 모암에서의 분리로 인한 파편들이 바람에 의해 이동하거나, 수류에 의한 이동으로 퇴적되어 수천만 년 동안의 높은 상재압력에 의해 지금의 퇴적암이 형성된 사실(정공수 등, 2000, 원종관 등, 1989)을 알 수 있을 것이다.

근원암의 입자구성 상태와 화학적 광물 조성상태가 각각 다른 퇴적암 그룹의 암석이 동일한 강도발현을 한다는 사실은 근원암의 입자구조나 화학적 조성에 상관

없이 입자와 입자가 맞물리는 표면의 접촉력에 의한다는 사실을 추리할 수 있다. 즉 높은 압력에 의한 압착용접과 교질물질(cementing minerals)에 의한 부착으로 압축강도가 발현된다고 볼 수 있다. 이러한 사실로 퇴적암의 강도는 교질물질의 부착력과 압착용접에 의한 표면 접촉력에 지배 받는다고 할 수 있다. 이점이 화강암과 변성암의 강도발현 특성과 다른 점이라 할 수 있다. 그림 2(b)를 포함한 그림 2를 대비해 보면 이들 사실을 추리할 수 있을 것이다.

화성암은 높은 온도의 마그마가 지중 혹은 지표에서 굳어져 생성된 암이다. 여기서 굳어지는 속도, 즉 온도구배와 압력에 따라 각종 화성암으로 형성되는데 이때 온도구배의 차이에 따라 입자끼리 결정 온도에 따라 결정작용이, 용융온도에 따라 형태가 다른 용융접합작용이 이루어지며(정지곤 등, 2000, 정형식, 2004) 이것이 강도를 결정하는 요인이라 볼 수 있다. 이 과정을 주도하는 것이 사장석(plagioclase)이며 이는 화성암을 구성하는 주 광물이다. 이 사장석의 생성이 온도구배에 직접적 영향을 주어 생성량의 정도가 결정되며 이에 따라 화성암종이 달라진다. 즉 사장석의 생성 정도에 따라 강도의 차이와 거동 특성이 달라진다고 볼 수 있다. 또한 공기와 물의 작용으로 풍화가 진행되면 사장석은 점토 광물화되기도 한다.

변성암은 퇴적암, 화성암들이 지각 내에서 용출하는 마그마의 높은 열과 이에 따른 높은 압력에 의해서 암석내의 광물입자의 조직이 재배열되어 물리적, 화학적, 공학적 성질이 모암과 다른 암석을 조성하는 변성작용에 의해 생성된 암석이다(안건상 등, 2000, 원종관 등, 1989). 이때 각 입자는 용융된 교질물질에 의해 입자표면에 막을 형성하고 입자와의 접촉이 이루어지며 용융체로 공극이 채워져 매우 강도가 큰 암석으로 변한다. 즉 변성암은 입자의 재결정, 맞물림 및 용융접합의 정도에 따라 암석의 강도 발현의 차이가 생긴다고 볼 수 있다.

## 8. 해석

본고의 4.1항에 제시한 원칙에 따라 시행하여 얻은 시험값과 자료정리 방법으로 거동이 다른 각종암에 대하여 타격값과 일축압축강도의 상관성을 해석하면 다음과 같다.

세일, 사암, 이암, 역암, 응회암 및 석회석등 6종의 퇴적암 568개 블럭에 대한 상관지수는 높게 산출되었다. 6개 암종의 거동이 같다는 것을 수식으로 증명한다고 볼 수 있다. 이들의 상관식은 식 (1)과 같다. 민덕기 등

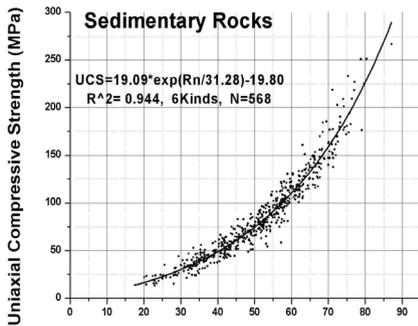
(2006)이 울산 퇴적암을 대상으로 제시한 경험식과 식 (1)과는 미세한 차이가 보이지만 이는 모집단의 차이 때문으로 사료된다.

$$UCS=19.09 \cdot \exp(Rn/31.28)-19.80 \quad (1)$$

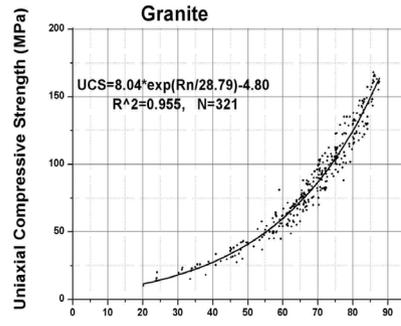
(R<sup>2</sup>=0.944, N=568)

화성암은 화강암, 유문암 및 안산암으로 구성되어 있

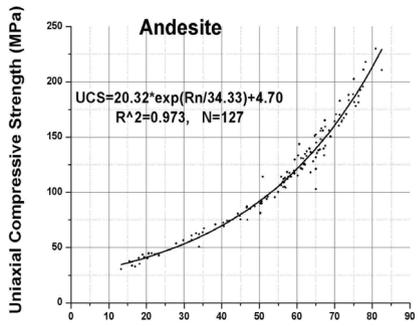
으나 그림 2(c)와 같이 거동이 각각 다르게 나타났기 때문에 각각의 암종에 따라 해석한다. 이 그림에서 보듯이 강도 크기의 순서는 안산암>유문암>화강암 순으로 나타나고 있다. 안산암은 타 암종에 비해 강도 범위가 30.5~229.9로 화성암 중에는 가장 넓게 분포되어 있다. 이들의 상관성 해석을 한 식이 화강암은 (2), 안산암은 (3) 및 유문암은 (4)로 각각 나타내었다. 이들의 결정계수는 매우 높게 산출되었다.



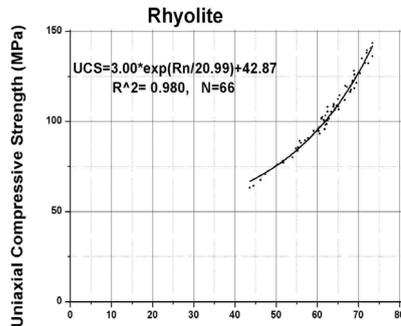
Schmidt Hammer Blow (Rn)  
(a) 퇴적암



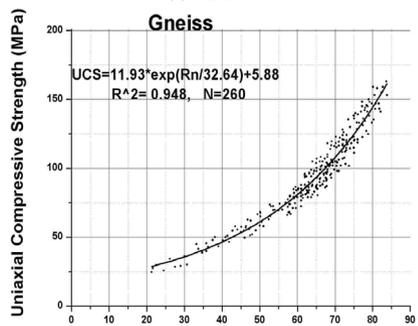
Schmidt Hammer Blow (Rn)  
(b) 화강암



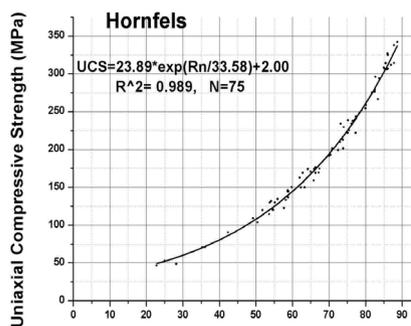
Schmidt Hammer Blow (Rn)  
(c) 안산암



Schmidt Hammer Blow (Rn)  
(d) 유문암



Schmidt Hammer Blow (Rn)  
(e) 편마암



Schmidt Hammer Blow (Rn)  
(f) 혼펠스

그림 4. 상관성 해석

- (2)  $UCS=8.04 \cdot \exp(Rn/28.79)-4.80$   
( $R^2=0.955$ ,  $N=321$ )
- (3)  $UCS=20.32 \cdot \exp(Rn/34.33)+4.70$   
( $R^2=0.973$ ,  $N=127$ )
- (4)  $UCS=3.00 \cdot \exp(Rn/20.99)+42.87$   
( $R^2=0.980$ ,  $N=66$ )

마암과 혼펠스의 상관성 해석을 한 것이 식 (5)와 식 (6)이다. 이들의 결정계수( $R^2$ )도 높은 편이다.

- (5)  $UCS=11.93 \cdot \exp(Rn/32.64)+5.88$
- (6)  $UCS=23.89 \cdot \exp(Rn/33.58)+2.00$   
( $R^2=0.989$ ,  $N=75$ )

변성암은 편마암과 혼펠스로 구성되어 있으며 그림 2(d)와 같이 타격 거동특성이 다르다. 그리고 혼펠스의 강도가 편마암보다 높은 거동을 하고 있음을 알 수 있다. 혼펠스는 강도 범위가 46.5~342.2 MPa로 넓다. 편

새로운 제안에 따라 Schmidt hammer의 타격으로 일축압축강도를 추정한 식들은 대상암 모두에서 결정계수가 높게 도출되었다.

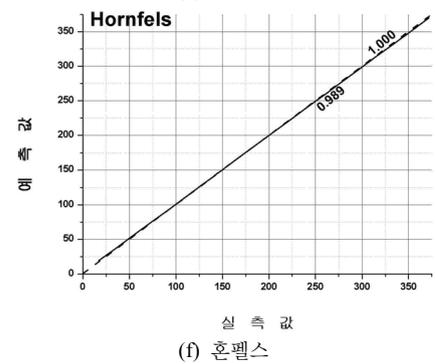
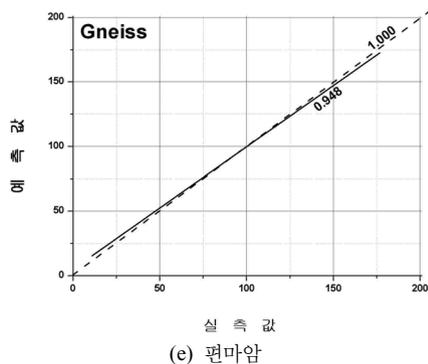
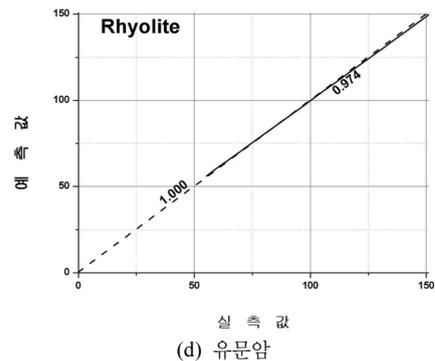
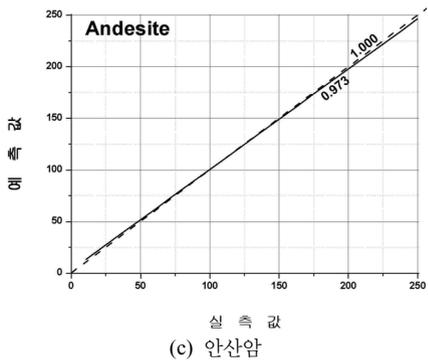
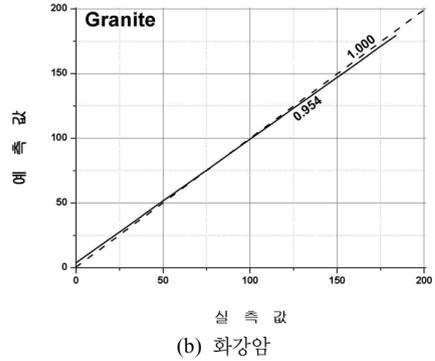
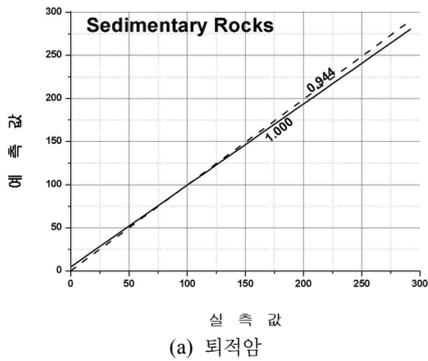


그림 5. 신뢰성 검증

### 9. 신뢰성 검증

앞장에서 추정된 경험식들은 결정계수가 높아 신뢰성이 높을 것으로 추정되나 이를 수식과 그림에서 확인해야 할 필요가 있다. 이를 위하여 일축압축강도의 실측값을 수평축으로, 본 연구에서 추정된 값을 수직축으로 한 평면좌표에서 상호값이 일치되면 기울기가 1인 직선(그림 5의 점선)에 적점이 되겠지만 실제로는 오차만큼 이격된 점이 발생하게 된다. 추정값이 점선에 가까이 접할수록(근접성) 실측값과 추정값의 차이가 작아질 것이다. 이들 점들을 회귀분석한 점선과 실선과의 차이가 오차가 될 것이다. 6개군의 암석에 대한 이와 같은 해석을 한 것이 그림 5이다. 그리고 검증 해석값의 통계를 요약한 것이 표 4이다. 표 4는 제안된 타격방법과 자료 처리방법에 따라 도출된 결과로 결정계수와 근접성이 모두 신뢰성이 높은 것으로 나타나고 있다. 이는 모집단의 규모가 큰 것에도 그 원인이 있을 것으로 사료된다.

이들 실험자료로 Origin Program-7.5를 사용하여 6개 암종(군)을 대상으로 신뢰도 검정을 시행한 결과는 모두 95% 신뢰도 구간에 적합하게 도시되는데 그 중 화강암의 것은 그림 6에 예시하였다. 화강암 321개 블

록 중 95% 신뢰도 곡선을 벗어난 점은 상부에 7점, 하부에 7점으로 모두 14점이 구간외의 적점이 되었다. 즉 4.4%의 오차가 발생한 것이다. 다른 암종(군)의 경우도 화강암의 예와 거의 비슷했으며 95% 신뢰도를 벗어나는 종류는 없었다. 이는 95% 신뢰도를 충분히 만족시키는 결과로 새로이 제안된 방법이 신뢰성이 높다는 것을 의미한다.

### 10. 결과의 고찰

본 연구의 결과물인 제1편, 제2편을 종합하면 기존 시험법의 대중인 ASTM, ISRM의 규정은 암석을 대상으로 한 시험법으로 보완해야 될 것으로 사료된다. 즉 내외의 강도가 균일한 콘크리트에는 적절한 방법으로 판단되나 풍화, 응력해방으로 인한 내외 강도 차이가 생기는 암반, 암석에는 최적의 방법이 아님이 이번 연구에서 밝혀졌다.

암석을 대상으로 Schmidt hammer 타격을 시행할 때에는 연속 타격법이 적합하며 이는 타격 에너지가 큰 hammer를 사용하면 타격값 15~87 사이에서 모든 값이 유효하며 이의 신뢰성도 높다. 종래는 타격값 30~60사이가 적절하며 그 외의 값은 불확실하다는 견해들이 많았다.

타격값의 해석은 타격거동이 동일한 암종끼리 묶어 시행함이 합리적이다. 이는 암종(군)에 따라 지질학적 인 특성과 이에 수반되는 강도발현 기구가 다르기 때문이다. 즉 화성암은 용융접합, 변성암은 재결정에 의한 접합, 퇴적암은 높은 상재압에 의한 압착접합이 주 강도발현 기구로 판단되기 때문이다. 물론 모든 암의 기본적 결합은 교결물질에 의한 것이나 위의 요소들은 각 암석의 접합 특성의 차이점이다.

본고에서 제안된 타격방법, 자료 처리방법에 의한 방법으로 도출된 결과를 사용한 일축압축강도와 타격값의 상관성 해석 결과는 신뢰성이 높게 도출되었다. 근접성으로 신뢰성을 검증함과 동시에 95% 신뢰도 검증

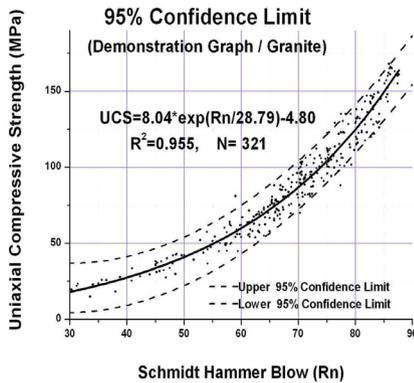


그림 6. 신뢰도 구간(예시-화강암)

표 4. 해석값의 통계

	시료수(블럭)	결정계수	근접성	오차(%)	비고
퇴적암	568	0.944	0.944	5.6	6개암종
화강암	321	0.955	0.954	4.6	화성암
안산암	127	0.973	0.973	2.7	화성암
유문암	66	0.980	0.974	2.6	화성암
편마암	260	0.948	0.948	5.2	변성암
혼펠스	75	0.989	0.989	1.1	변성암
계/평균	1,417	(0.954)	(0.953)	(4.7)	11암종

을 시행하여도 높은 신뢰성을 보여주고 있다. 이것은 새로운 방법이 가지는 정도 높은 해석기법이기도 하지만 해석 대상인 모집단의 규모가 1,417 블럭이 되는 점도 도움이 된 것으로 파악할 수 있겠다.

## 10. 결론

전국에 산재한 화성암, 변성암 및 퇴적암 11종, 1,417 블럭을 대상으로 일축압축강도와 Schmidt hammer 타격시험을 시행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- Schmidt hammer 타격값과 일축압축강도의 상관성 해석에서 화성암, 변성암 및 퇴적암은 지질학적 생성 배경의 차이에 따라 강도발현 특색이 각각 상이하다.
- 퇴적암군 내에서는 암종에 상관없이 Schmidt hammer 타격값과 일축압축강도의 상관성해석 거동은 동일하다.
- 화성암군 내의 각종 암석과 변성암군 내의 각종 암석의 상관성해석 거동은 암종마다 각각 상이하다.
- 동일거동을 나타내는 이들 암종(군)에 대한 6종의 경험식을 제안하였으며 해석값의 신뢰도는 모두 95% 내에 든다.

## 참고문헌

1. 민덕기, 문종규(2006), "Schmidt hammer 반발지수로 울산지역 퇴적암의 공학적 특성을 추정하기 위한 연구", 한국지반공학회 논문집, 제22권, 제10호, pp.139-150.
2. 민덕기, 문종규, 노재술(2008), "Brazilian 시험을 이용한 일축압축강도, 탄성계수의 추정(I)", 한국지반공학회 논문집, 제24권 제10호, pp.131-146.
3. 민덕기, 문종규, 노재술(2009), "Brazilian 시험을 이용한 일축압축강도와 탄성계수의 추정(II)", 한국지반공학회 논문집, 제25권 제8호, pp.65-76.
4. 민덕기, 문종규, 이상일(2007), "퇴적암의 공학지수를 추정하기 위한 L. A. 마모울 시험", 한국지반공학회 논문집, 제23권 제11호, pp.15-26.
5. 민덕기, 문종규, 이상일(2009), "암석을 대상으로 시행하는 Schmidt Hammer 타격법의 새로운 제안 (I)", 한국암반공학회 논문집, 제19권 제4호, pp.328-338.
6. 정공수, 등(2000), "퇴적암석학", 시그마프레스, pp.1-313.
7. 정지근 등(2000), "화성암석학", 시그마프레스, pp.1-390.
8. 정형식(2004), "암반역학", 도서출판 새론, pp.1-81.
9. 신희순, 선우 춘, 이두화(2000), "지질조사 및 암반분류", 구미서관, pp.1-491.
10. 안건상 등(2000), "변성암석학(Raymond L.A. 원저)", 시그마프레스, pp.1-198.
11. 원종관 등(1989), "지질학 원론", 도서출판 우성, pp.237-594.
12. 한국지질도(1995), 1:1,000,000, 한국자원연구소.
13. ASTM(D 4543-08), "Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances", Annual Book of ASTM Standards 2009.
14. ASTM D 5873-05, "Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method", Annual Book of ASTM Standards 2009.
15. ASTM (D 7012-07e1), "Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures", Annual Book of ASTM Standards 2009.
16. Dusseault, M.B. & Fooks, J.C. (1998), "Strength Characterization of a Typical Swelling Shale", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol.35, No.4/5, p.616-631.
17. Guo, R. & Thompson, P. (2004), "Influences of Changes in Mechanical Properties of an Overcored Sample on the Far-Field Stress Calculation", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.41, No.7, p.1153-1166.
18. Hanna, A. Hanna, M. & Ghaly, A. (1991), "Uplift behaviour of screw anchors in sand. II: Hydrostatic and flow conditions", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.28, No.6, p.794-808.
19. Hsu, S.C., Chiang, S.S. & Lai, J.R. (2004), "Failure Mechanisms of Tunnels in Weak Rock with Interbedded Structures", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.41, No.3, p.489-503.
20. ISRM (1979), "Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials", Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 16, No. 2, pp.135-140.rebound hardness", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., b Vol.15, pp.89-97.
21. ISRM (2009), "ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness : Revised version", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. Vol.46, pp. 627-634.
22. Kojima, K. & Adachi, T. (1989), "Evaluation of design parameters for earth tunnels", Proc. 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, V2, P771 -774. Pub. Rotterdam: A Balkema.

**민 덕 기**



1976년 연세대학교 공과대학 토목공학과  
공학사  
1980년 연세대학교 대학원 토목공학과  
공학석사  
1986년 연세대학교 대학원 토목공학과  
공학박사  
Tel: 052-259-2259  
E-mail: tkmin@ulsan.ac.kr  
현재 울산대학교 공과대학 건설환경공학부  
교수

**문 중 규**



1964년 서울대학교 공과대학 토목공학과  
공학사  
2002년 울산대학교 대학원 토목공학과  
공학석사  
2007년 울산대학교 대학원 토목공학과  
공학박사  
Tel: 052-259-1668  
E-mail: 1067mjk@hanmail.net  
현재 동명기술공단(주) 부사장, 울산대  
학교 건설환경공학부 겸임교수

**이 상 일**



2005년 부산대학교 공과대학 토목공학과  
공학사  
2009년 울산대학교 대학원 토목공학과  
석·박사통합과정 수료  
Tel: 031-420-4166  
E-mail: lsi5812@yahoo.co.kr  
현재 한국농어촌공사 감사실